	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	10-04-2012	A
Dependencia	Aprobado		Pág.	
DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	SUBDIRECTOR ACADEMICO		i(197)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	LUIZA FERNANDA SÁNCHEZ GIL YERMIS FABIAN VÉLEZ		
FACULTAD	CIENCIAS AGRARIAS Y DEL AMBIENTE		
PLAN DE ESTUDIOS	INGENIERIA AMBIENTAL		
DIRECTOR	GUSTAVO ELBERTO EPALZA SÁNCHEZ		
TÍTULO DE LA TESIS	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA PILOTO PARA LA DESCONTAMINACION DE AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN LA UFPSO, EMPLEANDO LAS ESPECIES <i>COSTUS SPICATUS</i> Y <i>HELICONIA PSITTACORUM</i>		
RESUMEN (70 palabras aproximadamente)			
<p>LA CONTAMINACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO AFECTA EL EQUILIBRIO DE LOS ECOSISTEMAS A NIVEL MUNDIAL, DISMINUYE LA CALIDAD DE VIDA DE LA POBLACIÓN Y LIMITA SU USO Y APROVECHAMIENTO. LA FITORREMEDIACIÓN SE PRESENTA COMO UNA TECNOLOGÍA ECONÓMICA DE FÁCIL CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO QUE PERMITE LA DESCONTAMINACIÓN DE CUERPOS HÍDRICOS. EN ESTE PROYECTO SE EMPLEARON LAS ESPECIES NATIVAS <i>COSTUS SPICATUS</i> Y <i>HELICONIA PSITTACORUM</i>, PARA LA FITORREMEDIACIÓN DE AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN LA UFPSO.</p>			
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 181	PLANOS:	ILUSTRACIONES:	CD-ROM: 1



**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA PILOTO PARA LA
DESCONTAMINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN LA UFPSO,
EMPLEANDO LAS ESPECIES *COSTUS SPICATUS* Y *HELICONIA PSITTACORUM***

AUTORES:

**LUISA FERNANDA SÁNCHEZ GIL
YERMIS FABIÁN VÉLEZ**

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Ambiental

Director

**GUSTAVO ELBERTO EPALZA SÁNCHEZ
M. Sc., Químico e Ingeniero Químico**

Asesores

**Esp. LUIS AUGUSTO JÁCOME GÓMEZ
M. Sc. DIANA MILENA VALDES SOLANO**

**UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y DEL AMBIENTE
INGENIERÍA AMBIENTAL**

Ocaña, Colombia

Agosto de 2016

Dedicatoria

A Dios, por ser nuestro mayor guía y permitirnos seguir el camino.

A nuestros padres y familiares, por el esfuerzo, el apoyo incondicional y los buenos consejos.

A nuestros docentes, por formarnos y compartir sus conocimientos.

Agradecimientos

A todas aquellas personas que brindaron un apoyo en el desarrollo de la investigación: M. Sc. Juan Carlos Hernández Criado y Esp. Luis Augusto Jácome Gómez, por su gestión, diligencia y confianza; a los coordinadores de los laboratorios de aguas, microbiología y nutrición: M. Sc. Diana Milena Valdes Solano, Esp. Johana Ximena Páez Pacheco, zootecnista José Efraín Salcedo por el apoyo, tiempo y disposición. Al grupo de investigación ambiental agropecuario y de desarrollo sostenible GI@DS y al semillero CIEBB, al cual pertenecemos.

A nuestro director, M. Sc. Carlos Elberto Epalza Sánchez, por su orientación, acompañamiento y apoyo en las diferentes fases del investigación. A la división de investigación y extensión por la financiación de la investigación y a la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña por su soporte en el desarrollo de la misma.

A ellos, a todos, las gracias.

Resumen

La contaminación del recurso hídrico afecta el equilibrio de los ecosistemas a nivel mundial, disminuye la calidad de vida de la población y limita su uso y aprovechamiento. La fitorremediación se presenta como una tecnología económica de fácil construcción, operación y mantenimiento que permite la descontaminación de cuerpos hídricos. En este proyecto se emplearon las especies nativas *Costus spicatus* y *Heliconia psittacorum*, para la fitorremediación de aguas residuales generadas en la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. El sistema piloto consta de un tanque de 500L que almacena el agua residual, conectado a tres unidades de tratamiento recreando un humedal subsuperficial, que contienen gravas de diferente granulometría y las especies vegetales (*C. spicatus*, *H. psittacorum* y su combinación). Se trabajaron dos volúmenes (25L y 12.5L) y dos tiempos de retención (48h y 120h). Se analizó el agua antes y después del tratamiento para determinar el porcentaje de remoción en 20 parámetros. En el mejor de los casos, con la especie *C. spicatus* se obtuvo una remoción de 91% para DQO, 91% para DBO₅ y 96% para SST; para la *H. psittacorum* se obtuvo una remoción de 96% para DQO, 95% para DBO₅ y de 99% para SST, y la combinación 50:50 de ambas especies obtuvo una remoción de 89% para DQO, 90% para DBO₅ y de 97% para SST. Los resultados muestran que la fitorremediación de aguas residuales con las especies nativas trabajadas es una alternativa de gran potencial para la descontaminación de aguas. Por tal razón, esta tecnología podría ser usada en regiones como el Catatumbo o en zonas remotas sin posibilidad de tratamiento de sus vertimientos.

Palabras clave: Fitorremediación, humedal subsuperficial, aguas residuales, *Heliconia psittacorum*, *Costus spicatus*.

Abstract

The pollution of water resources affects the balance of ecosystems around the world, decreases the quality of life of the population and limits their use and exploitation. The phytoremediation is an economical technology of easy construction, operation and maintenance, enabling the decontamination of water bodies. This project used native species *Costus spicatus* and *Heliconia psittacorum*, for phytoremediation of wastewater generated in the University Francisco de Paula Santander Ocaña. The pilot system consists of a 500L tank that stores the residual water, it's connected to three treatment units recreating a subsurface wetland, containing gravel of different particle sizes and planted species (*C. spicatus*, *H. psittacorum* and their combination). We used two volumes (25L and 12.5L) and two retention times (48h and 120h). The water was analyzed before and after treatment to determine the percentage of removal in 20 parameters. At their best the species *C. spicatus* got a removal of 91% for COD, 91% for BOD₅ and 96% for TSS; *H. psittacorum* got a removal of 96% for COD, 95% for BOD₅ and 99% for TSS, and the combination 50:50 of both species obtained a removal of 89% for COD, 90% for BOD₅ and 97% for TSS. The results show that the phytoremediation of wastewater with the used native species is an alternative of great potential for the decontamination of water. For this reason, this technology could be used in regions such as Catatumbo or in remote areas without possibility of treatment of their discharges.

Keywords: Phytoremediation, subsurface wetland, wastewater, *Heliconia psittacorum*, *Costus spicatus*.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1: Diseño y evaluación de un sistema piloto para la descontaminación de aguas residuales generadas en la UFPSO, empleando las especies <i>Costus spicatus</i> y <i>Heliconia psittacorum</i>	2
1.1 Problema de Investigación	2
1.2 Planteamiento del Problema.....	2
1.3 Formulación del Problema	3
1.4 Objetivos	3
1.4.1 Objetivo general.	3
1.4.2 Objetivos específicos	3
1.5 Justificación.....	4
1.6 Delimitaciones.....	5
1.6.1 Temporal.....	5
1.6.2 Geográfica	5
1.6.3 Conceptual	5
1.6.4 Operativa	5
Capítulo 2: Marco Referencial	6
2.1 Antecedentes	6
2.2 Marco histórico	9
2.2.1 Surgimiento de los tratamientos de aguas residuales a nivel mundial	9
2.2.2 Tratamientos de aguas residuales en Colombia.....	11
2.2.3 Aguas residuales a nivel regional.	11
2.3 Marco contextual.....	12
2.4 Marco conceptual	15
2.4.1 Conceptos relacionados con las aguas residuales.....	15
2.4.2 Características físicas de las aguas residuales	16
2.4.3 Características químicas de las aguas residuales	17
2.4.4 Características microbiológicas de las aguas residuales.....	19
2.4.5 Características de los humedales artificiales.....	19

2.5 Marco teórico	27
2.5.1 Estudios sobre la problemática	27
2.5.2 Efectos del problema	27
2.5.3 Estudios sobre fitorremediación	31
2.5.4 Estudios sobre las plantas utilizadas	33
2.6 Marco legal.....	36
Capítulo 3: Diseño Metodológico.....	40
3.1 Tipo de Investigación	40
3.2 Población.....	43
3.3 Muestra.....	44
3.3.1 Etiquetado de las muestras	47
3.3.2 Cuaderno de campo.	48
3.4 Recolección de Información.....	48
3.5 Análisis de Información	52
Capítulo 4: Resultados.....	533
4.1 Revisión bibliográfica como guía para el diseño y construcción del sistema piloto.....	53
4.2 Diseño propuesto por los autores	60
4.3 Evaluación del sistema piloto.....	65
4.4 Respuesta fisiológica de las especies vegetales	115
4.5 Socialización del proyecto a estudiantes de la UFPSO.....	117
Capítulo 5: Conclusiones.....	118
Capítulo 6: Recomendaciones.....	122
Bibliografía	1244
Apéndices.....	135

Apéndice A. Evaluación del nivel de contaminación de las muestras por triplicado con su promedio (\bar{x}) y desviación estándar (σ).....	136
Apéndice B. Análisis de los sustratos utilizados. Mediciones por triplicado, promedio (\bar{x}) y desviación estándar (σ).....	168
Apéndice C. Registro fotográfico.....	1700
Apéndice D. Folleto informativo para la socialización del proyecto.....	179

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Mecanismos de fitorremediación.....	25
Tabla 2. Características de los principales compuestos del agua residual.....	28
Tabla 3. Principales enfermedades causadas por el agua.....	30
Tabla 4. Mediciones según las posibles combinaciones de las variables.....	42
Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos que se analizan a las muestras de agua residual.....	50
Tabla 6. Parámetros microbiológicos que se analizan a las muestras de agua residual.....	52
Tabla 7. Presupuesto global por fuentes de financiación (en miles de pesos).....	54
Tabla 8. Características de los humedales construidos.....	54
Tabla 9. Diferencias entre humedal superficial y humedal subsuperficial.....	55
Tabla 10. Condiciones a evaluar en el sistema piloto.....	63
Tabla 11. Resultados para demanda química de oxígeno (DQO).....	67
Tabla 12. Resultados para demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅).....	69
Tabla 13. Resultados para sólidos suspendidos totales (SST).....	72
Tabla 14. Resultados para sólidos sedimentables (SSED).....	74
Tabla 15. Resultados para grasas y aceites.....	76
Tabla 16. Resultados para fosfatos.....	78
Tabla 17. Resultados para fósforo total.....	80
Tabla 18. Resultados para nitratos.....	84
Tabla 19. Resultados para nitritos.....	86
Tabla 20. Resultados para nitrógeno amoniacal.....	88
Tabla 21. Resultados para nitrógeno total.....	90
Tabla 22. Resultados para fluoruros.....	92
Tabla 23. Resultados para sulfatos.....	94
Tabla 24. Resultados para aluminio.....	96
Tabla 25. Resultados para cobre.....	98
Tabla 26. Resultados para hierro.....	100
Tabla 27. Resultados para hierro en los sustratos.....	103

Tabla 28. Resultados para color real.....	104
Tabla 29. Resultados para conductividad.....	106
Tabla 30. Resultados para alcalinidad.....	108
Tabla 31. Resultados para dureza total.....	110
Tabla 32. Resultados para dureza total en los sustratos.....	111
Tabla 33. Resultados para Coliformes totales.....	113
Tabla 34. Resultados para Escherichia Coli.....	114

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Zonificación de la UFPSO.....	13
Figura 2. Ubicación geográfica de Ocaña en Norte de Santander.....	14
Figura 3. Humedal superficial.....	20
Figura 4. Humedal subsuperficial de flujo horizontal.....	21
Figura 5. Humedal subsuperficial de flujo vertical.....	22
Figura 6. Proceso de fitodegradación.....	22
Figura 7. Proceso de fitoestabilización.....	23
Figura 8. Proceso de fitoextracción.....	23
Figura 9. Proceso de fitovolatilización.....	24
Figura 10. Proceso de rizofiltración.....	24
Figura 11. Mecanismos de la fitorremediación.....	31
Figura 12. Clasificación taxonómica de la especie <i>H. psittacorum</i>	33
Figura 13. Clasificación taxonómica de la especie <i>C. spicatus</i>	36
Figura 14. Fases en el proceso cuantitativo.....	40
Figura 15. Fases a seguir para la ejecución del proyecto.....	41
Figura 16. Plano de la red sanitaria de la UFPSO.....	45
Figura 17. Modelo de etiqueta para muestras de agua.....	47
Figura 18. Clasificación de los humedales.....	53
Figura 19. Procesos de depuración de los humedales artificiales.....	56
Figura 20. Diseño del sistema piloto.....	61
Figura 21. Sustratos seleccionados y su porcentaje en el medio filtrante.....	62
Figura 22. Sistema piloto construido.....	64
Figura 23. <i>Heliconia psittacorum</i> y <i>Costus spicatus</i> listas para trasplantar al sistema piloto.....	64
Figura 24. Muestras de agua residual.....	65
Figura 25. Resultados obtenidos para DQO bajo las condiciones evaluadas.....	68
Figura 26. Resultados obtenidos para DBO ₅ bajo las condiciones evaluadas.....	71
Figura 27. Resultados obtenidos para SST bajo las condiciones evaluadas.....	73

Figura 28. Resultados obtenidos para SSED bajo las condiciones evaluadas.....	75
Figura 29. Resultados obtenidos para grasas y aceites bajo las condiciones evaluadas.....	77
Figura 30. Resultados obtenidos para fosfatos bajo las condiciones evaluadas.....	79
Figura 31. Resultados obtenidos para fósforo total bajo las condiciones evaluadas.....	82
Figura 32. Resultados obtenidos para nitratos bajo las condiciones evaluadas.....	85
Figura 33. Resultados obtenidos para nitritos bajo las condiciones evaluadas.....	87
Figura 34. Resultados obtenidos para nitrógeno amoniacal bajo las condiciones evaluadas.....	89
Figura 35. Resultados obtenidos para nitrógeno total bajo las condiciones evaluadas.....	91
Figura 36. Resultados obtenidos para fluoruros bajo las condiciones evaluadas.....	93
Figura 37. Resultados obtenidos para sulfatos bajo las condiciones evaluadas.....	95
Figura 38. Resultados obtenidos para aluminio bajo las condiciones evaluadas.....	97
Figura 39. Resultados obtenidos para cobre bajo las condiciones evaluadas.....	99
Figura 40. Resultados obtenidos para hierro bajo las condiciones evaluadas.....	101
Figura 41. Aporte de hierro por cada sustrato en los volúmenes trabajados.....	103
Figura 42. Resultados obtenidos para color real bajo las condiciones evaluadas.....	105
Figura 43. Resultados obtenidos para conductividad bajo las condiciones evaluadas.....	107
Figura 44. Resultados obtenidos para alcalinidad bajo las condiciones evaluadas.....	109
Figura 45. Aporte de dureza total por cada sustrato en los volúmenes trabajados.....	112
Figura 46. Evolución de un brote de la especie <i>C. spicatus</i> en la unidad experimental 1.....	116
Figura 47. Germinación, adaptación y maduración de la <i>H. psittacorum</i>	116
Figura 48. Socialización del proyecto a estudiantes de la UFPSO.....	117

Lista de Abreviaturas

ARD: Aguas Residuales Domésticas

ARnD: Aguas Residuales no Domésticas

DANE: Departamento Administrativo Nacional de Estadística

DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno, medida a los cinco (5) días

DQO: Demanda Química de Oxígeno

E. Coli: Escherichia Coli

EAA: Espectrofotómetro de Absorción Atómica

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales

LQCI: Laboratorio Químico de Consultas Industriales

OD: Oxígeno Disuelto

pH: Potencial de Hidrógeno

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

SSED: Sólidos Sedimentables

SST: Sólidos Suspendidos Totales

UFPSO: Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

UV-VIS: Ultravioleta Visible

UIS: Universidad Industrial de Santander

VLMP: Valor Límite Máximo Permisible

Introducción

La contaminación del recurso agua es una problemática que se ha intensificado en la actualidad por el crecimiento demográfico que se está presentando, por lo tanto hay una mayor demanda del recurso hídrico ya que la mayoría de las actividades antrópicas requieren de éste en los procesos domésticos, industriales, comerciales e institucionales, generando grandes cantidades de residuos líquidos, devolviéndolos con niveles altos de contaminación al sistema de alcantarillado.

Muchos actores de la sociedad se preocupan por la situación de las cuencas, por lo que se construyen sistemas de tratamiento y descontaminación de aguas, lagunas de oxidación, métodos de desinfección físicos, químicos, entre otros; en este proyecto se quiere hacer énfasis a un proceso biológico como es la fitorremediación, que es la utilización de plantas y material vegetal para la descontaminación de las fuentes hídricas. Este sistema es una solución amigable con el ambiente porque utiliza organismos del medio, es una tecnología limpia, es económica y ha obtenido muy buenos resultados en otros campos como son los procesos mineros y de hidrocarburos en la absorción de metales pesados, sustancias radioactivas y contaminantes en general, disminuyendo el impacto ambiental que producen estas actividades y otras metodologías.

Se estudiará la capacidad de absorción de las especies *Costus spicatus* y *Heliconia psittacorum*, se determinará la cantidad y la identidad del contaminante que afecta al medio, posteriormente se cuantifica la disminución de estas sustancias después del tratamiento y de esta manera conocer la eficiencia del sistema y sugerir su aplicación a sistemas acuáticos más grandes como PTAR municipales e industriales y afluentes de ríos.

Capítulo 1: Diseño y evaluación de un sistema piloto para la descontaminación de aguas residuales generadas en la UFPSO, empleando las especies *Costus spicatus* y *Heliconia psittacorum*

1.1 Problema de Investigación

Inadecuado tratamiento de aguas residuales.

1.2 Planteamiento del Problema

Actualmente, una de las problemáticas más agobiantes a nivel global son los vertimientos de aguas residuales a cuerpos hídricos sin tratamientos adecuados. Según un reporte del Ministerio de agricultura y desarrollo rural de Colombia, los datos del viceministerio de agua y saneamiento básico indican que sólo el 9% de las aguas de alcantarillado son tratadas en el país, a nivel mundial las aguas residuales sin tratar están entre un 85 a 95% de los vertimientos totales (Ministerio de agricultura y desarrollo rural, 2011).

Un generador de estos residuos líquidos es la Universidad Francisco de Paula Santander seccional Ocaña, Norte de Santander, que posee una comunidad estudiantil, docente y administrativa de 6721 personas en sus tres estamentos (UFPSO, 2016), los cuales requieren de una demanda importante del recurso hídrico para la realización de sus actividades diarias y suplir sus necesidades, dichas aguas después de ser servidas se vierten a la cuenca del Rio Algodonal después de un tratamiento inadecuado, afectando a la población situada aguas abajo del campus universitario con sus aguas contaminadas, limitando el uso del recurso para sus actividades, además genera así contaminación al medio acuático y su ecosistema adyacente, grandes problemas en la salud, disminución en la calidad de vida de la población, deterioro en la calidad del agua, afectación a la flora y

fauna del lugar, olores ofensivos, proliferación de vectores, alteración en los procesos biológicos, entre otros.

La UFPSO cuenta actualmente con 18 pozos sépticos, de los cuales 10 se encuentran colmatados, además de estar operando ineficientemente, lo que demuestra que no supe los requerimientos de la universidad en cuanto a su extensión y población. El agua residual del pozo séptico ubicado detrás del restaurante institucional será el objeto de estudio de este proyecto, permitiendo estudiar nuevas alternativas de tratamiento, que trabajado de manera independiente o en conjunto pueda tener una mejor eficiencia en la descontaminación de las aguas servidas.

1.3 Formulación del Problema

¿Emplear un sistema de tratamiento por fitorremediación con las especies *Costus spicatus* y *Heliconia psittacorum*, servirá como mecanismo eficiente para la remoción de contaminantes en las aguas residuales generadas por la UFPSO?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar y evaluar un sistema piloto para la descontaminación de aguas residuales generadas en la UFPSO, empleando las especies *Costus spicatus* y *Heliconia psittacorum*.

1.4.2 Objetivos específicos

Diseñar y construir un sistema piloto de fitorremediación para la descontaminación de aguas residuales empleando las especies *Costus spicatus* y *Heliconia psittacorum*.

Evaluar el nivel de contaminación del agua residual antes del tratamiento del sistema piloto de fitorremediación (afluente) y después de él (efluente).

Calcular los niveles de remoción para cada parámetro analizado del agua residual.

Verificar la efectividad del sistema piloto basado en el cumplimiento de la resolución 0631 de 2015.

1.5 Justificación

La fitorremediación es un sistema que se ha utilizado a nivel mundial para la descontaminación de cuerpos hídricos, empleando diferentes clases de plantas. En un estudio realizado en la Universidad del Valle en el 2012 señala que la especie *Heliconia psittacorum* demostró ser tolerante al tratamiento con lixiviados, por lo cual esta planta presenta un buen potencial fitorremediador en su uso en humedales construidos para el tratamiento de lixiviados (Aulestia Aguilar, 2012). Por tal razón, se plantea el uso de esta planta para la descontaminación de aguas residuales al igual que la especie *Costus spicatus* que es una planta autóctona del país que posiblemente también tenga efectos descontaminantes en dichas aguas.

La implementación de un sistema de descontaminación de aguas residuales usando las especies *H. psittacorum* y *C. spicatus* es importante porque se contribuye con el aporte de una metodología que emplea especies vegetales nativas de la región que no han sido estudiadas para la descontaminación de fuentes hídricas y que sea aplicable en muchos sectores como el industrial, domiciliario, energético y en general, en todas las actividades que generen residuos líquidos que perjudican seriamente los cuerpos hídricos. En este caso particular, servirá para el tratamiento de las aguas residuales generadas por la Universidad Francisco de Paula Santander, mitigando y en lo posible eliminando los impactos negativos y la problemática presentada en esta institución de educación superior, viéndose beneficiados prioritariamente estudiantes, administrativos, docentes y población circunvecina.

Este sistema también puede contribuir con el crecimiento tecnológico y el ahorro de recursos de una organización al no destinar sus recursos financieros en costosos

tratamientos y sistemas de descontaminación. En resumen, este sistema de fitorremediación es mucho más limpio, económico, con mejor potencial para la descontaminación de cuerpos hídricos, y más amigable con el medio ambiente.

1.6 Delimitaciones

1.6.1 Temporal

La ejecución de este proyecto tendrá una duración aproximada de 8 meses.

1.6.2 Geográfica

El proyecto se desarrollará dentro del campus de la Universidad Francisco de Paula Santander - Ocaña, Norte de Santander, Colombia.

1.6.3 Conceptual

Fitorremediación, vertimiento, agua residual, humedal, afluente, remoción, efluente, descontaminación de aguas residuales, especies vegetales.

1.6.4 Operativa

Para la realización de este proyecto se cuenta con recursos económicos destinados para investigación por la División de Investigación y Extensión DIE y con recursos propios. También se cuenta con personal idóneo y capacitado para la realización del proyecto, recursos tecnológicos como el espectrofotómetro ultravioleta visible UV/Vis, equipos y reactivos de laboratorio y la infraestructura que nos presta el campus universitario como el vivero, los laboratorios, la biblioteca y el predio donde se construirá el humedal.

Capítulo 2: Marco Referencial

2.1 Antecedentes

Por contaminación de las aguas se entiende el aporte de materias o formas de energía de una manera directa o indirecta que impliquen una alteración o modificación de su calidad en relación a sus usos posteriores o a su función ecológica.

No solo las aguas superficiales son contaminadas también las subterráneas (CORPONOR, 2012), por ello no podemos suponer de estas una fuente alterna y debemos diseñar e implementar nuevas metodologías para la descontaminación de las aguas residuales.

El tratamiento de aguas residuales en Colombia es fundamental para la recuperación ambiental de las cuencas hidrográficas más contaminadas del país y para mejorar la calidad de vida de la población.

A la hora de eliminar los contaminantes que existen en el agua, se pueden usar desde sencillos procesos físicos como la sedimentación, que consiste en dejar que los contaminantes se depositen en el fondo por gravedad, hasta otros más complejos como la filtración, a través de mallas y tamizados, o la evaporación. También se utilizan métodos químicos, como la precipitación química o la reducción electrolítica; y otros biológicos, como son lodos activos, filtros bacterianos o lagunaje, conocidos también como tratamientos secundarios. Son precisamente estos últimos los más habituales en el tratamiento de aguas en Colombia (Twenergy, 2014).

Los siguientes son procesos realizados por la comunidad científica que representa la avanzada en los últimos años y que están aplicándose actualmente:

Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales (Martelo & Lara Borrero, 2012), los tratamientos de aguas residuales que involucran macrófitas flotantes han demostrado ser eficientes en la remediación de aguas con contenidos de nutrientes, materia

orgánica y sustancias tóxicas como arsénico, zinc, cadmio, cobre, plomo, cromo, y mercurio. Su importancia radica en su aptitud para ser empleados en núcleos rurales debido a su bajo consumo de energía convencional y la practicidad en el montaje y operación de los sistemas de tratamiento.

La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales (Garcés Giraldo, Mejía Franco, & Santamaria Arango, 2014), para la minimización de los impactos causados en los recursos hídricos por las industrias, en los últimos años se han implementado los procesos de oxidación avanzada (POA) como una alternativa tecnológicamente viable y novedosa para el tratamiento de los efluentes líquidos de dichas empresas. Los POA consisten básicamente en la formación de radicales hidroxilos altamente oxidantes, los cuales contribuyen a la mineralización total de los compuestos contaminantes presentes en los efluentes industriales. Entre los procesos más utilizados se encuentra la fotocatalisis que consiste en la aceleración de una fotorreacción mediante un catalizador.

La electrocoagulación como una alternativa para el tratamiento de aguas residuales (Arango Ruiz, 2005), esta tecnología es conocida desde principios del siglo XX, ha evolucionado siendo eficazmente aplicada en la actualidad para el tratamiento de las aguas residuales de la industria del papel, la minería y la industria de metales pesados. Además, la electrocoagulación se ha aplicado para tratar agua que contiene la pérdida de alimentos, grasas, tintes, partículas suspendidas, entre otros.

Fitodegradación de las aguas residuales con pesticida Mertect en la industria bananera empleando fotocatalisis con dióxido de titanio y lámpara de luz ultravioleta (Arroyave Rojas & Cruz Castellanos, 2007), en la experimentación se utilizó una lámpara de luz ultravioleta, una cuba de vidrio para el almacenamiento de la solución del pesticida a degradar y una bomba que permitía la recirculación de la solución por el sistema de tratamiento; la degradación del pesticida se determinó mediante espectrofotometría ultravioleta/visible.

Tratamiento de las aguas residuales de una industria textil utilizando colector solar (Garcés Giraldo & Peñuela Mesa, 2007), se utilizó un colector solar cilindro parabólico compuesto con base en los resultados obtenidos en la investigación de la degradación del colorante naranja reactivo 84, se seleccionaron las mejores condiciones de degradación y mineralización de dicha investigación para ser aplicada a un agua residual real de una industria de teñido de tejidos de punto que contuvieran este colorante.

Por otra parte, es importante reconocer el éxito de un sistema descontaminante a partir de fitorremediación, empleado para otro tipo de aguas con altas cargas de contaminación como son los lixiviados, aunque estos residuos líquidos provengan de otras actividades, también son un serio problema para las fuentes hídricas, cuerpos de recepción y suelos. El proyecto, Diseño de sistemas de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario El Inga mediante electrocoagulación y fitorremediación (Guevara, Guanoluisa, & De la Torre, 2014), es un sistema de tratamiento para lixiviados con altas cargas de DBO₅, SST, DQO y color; se trataron dos tipos de muestra que se manejaban en el vertedero, la primera es un lixiviado con tratamiento previo con lodos activados y biorreactores de membranas, y la segunda muestra es lixiviado crudo. Se utilizó la electrocoagulación con 8 electrodos de aluminio durante 20 minutos como primer tratamiento, la fitorremediación a partir de pastos, alfalfa y maní forrajero como segunda fase y por último absorción en carbón activado. Para esto se utilizó un humedal artificial de flujo subsuperficial vertical. Como resultado el nivel de contaminación se redujo hasta los valores permitidos por la ordenanza 213 del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito (MDMQ) para descargas líquidas.

Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales (Delgadillo O. , Camacho, Pérez, & Andrade, 2010), es un libro en el que explica de manera detallada las definiciones, parámetros y seguimientos que se deben tener en cuenta a la hora de construir un humedal artificial, a su vez describe la experiencia que tuvieron los realizadores del trabajo con la especie vegetal que trabajaron: la Totora (*Scirpus californicus*) en el que se estudia el sustrato óptimo para la especie, las características fisiológicas de las plantas, su reacción ante el riego de las mismas con dos tipos de aguas demostrando que puede ser utilizada para este tipo de tratamientos. El libro se divide en siete capítulos: Los humedales artificiales, La totora, planta fitodepuradora, Diseño y construcción de humedales

artificiales, Monitoreo y muestro de humedales artificiales, Parámetros físicos para la caracterización de aguas residuales, Parámetros microbiológicos para la caracterización de aguas residuales, y Parámetros químicos para los mismos.

2.2 Marco histórico

2.2.1 Surgimiento de los tratamientos de aguas residuales a nivel mundial. Desde los inicios el saneamiento y tratamiento a aguas residuales nace como respuesta a un problema de índole sanitaria. La historia tiene sus raíces en la antigüedad, en la que su desarrollo fue motivado por el de las ciudades y centros religiosos o comerciales. Como ejemplo destacable podemos señalar la red de saneamiento con la que ya contaba la ciudad de Roma, construida sobre el 600 A.C. y denominada “cloaca máxima”, que vertía los residuos de la ciudad al río Tíber (ACEMSA, 2010).

Se han encontrado métodos de depuración de residuos e instalaciones de alcantarillado en lugares prehistóricos de Creta y en las antiguas ciudades asirias. Las canalizaciones de desagüe construidas por los romanos todavía funcionan en nuestros días, aunque su principal función era el drenaje (Báez, 2003).

La industrialización tuvo como consecuencia la masificación incontrolada de la población en torno a los centros de producción, creándose unas condiciones sanitarias absolutamente penosas, las cuales dieron lugar a numerosas epidemias que pusieron en evidencia la conexión entre el estado sanitario del agua de consumo y el desarrollo de enfermedades.

A pesar de que muchas ciudades disponían desde varios siglos antes, de conductos de evacuación de aguas, éstos se habían concebido exclusivamente para drenaje de aguas pluviales, hasta el punto de que en la Inglaterra de principios del siglo XIX estaba prohibido verter aguas residuales a esos conductos.

El primer paso para la solución del problema fue la construcción de desagües de los edificios – en ese entonces, solamente disponían de pozos negros (actuales pozos sépticos)

– y su conexión a los conductos de drenaje, dando origen a los primeros alcantarillados de tipo unitario, sistema que posteriormente fue adoptado por la mayor parte de las ciudades.

En 1842, Sir Edwin Chadwick elaboró un informe sobre las condiciones sanitarias en Gran Bretaña en el que se establecía la necesidad de recoger las aguas residuales en un sistema específico de alcantarillado, proponiendo la utilización de conductos de gres y la separación de las aguas residuales de las pluviales, advocating por los sistemas separativos con su célebre sentencia: “El agua pluvial al río y la residual al campo”. A partir de 1847 se estableció la obligatoriedad de conectar los edificios a las redes de alcantarillado.

En definitiva, es a partir de la iniciativa británica a mediados del siglo pasado cuando se establecen las bases modernas del saneamiento, específicamente en lo referente al primer aspecto del mismo: la recogida y transporte de las aguas residuales.

Sin embargo, la construcción de las primeras redes de alcantarillado puso de manifiesto que aunque contribuían a la reducción del número de puntos de vertido, mejorando evidentemente las condiciones locales respecto a la situación anterior, se producía una mayor concentración de la contaminación, que inmediatamente produjo un agravamiento del estado de los ríos, creando condiciones higiénicas y ambientales inaceptables, por lo que se sugirió la idea de que el vertido de aguas residuales no debería realizarse a aquellos, sino que debería utilizarse para fertilizar el suelo, con lo cual se proponía el primer sistema de tratamiento filtrándolas con las capas del suelo y se completaba el anterior concepto de saneamiento, basado en la recogida y transporte del agua residual, con el de su depuración.

A partir de este punto, se desarrollan los primeros sistemas de depuración, inicialmente dirigidos a la eliminación de materias sólidas y posteriormente complementadas con la de la materia orgánica soluble mediante los tratamientos biológicos, primero los filtros percoladores (1897) y posteriormente los fangos activados (1914).

Podemos decir que a finales de los años sesenta ya se ha desarrollado una base científica considerable en lo que se refiere a los tratamientos biológicos convencionales, que de hecho ha perdurado hasta nuestros días.

2.2.2 Tratamientos de aguas residuales en Colombia. En Colombia el tratamiento de aguas se ha convertido en uno de los problemas ambientales más críticos y crecientes. La descarga de aguas residuales domésticas y los vertimientos agropecuarios están contaminando los ríos, las aguas subterráneas, los humedales y las represas de agua, causando un grave daño al medio ambiente y a la salud humana.

Los vertimientos generados por el sector agrícola colombiano son los más contaminantes. A este tipo de descargas les siguen las realizadas por grandes ciudades como Bogotá, Cali, Medellín, Cartagena y Barranquilla; seguidas por las del sector industrial, sobre todo por los productores de alimentos. Por ello, el tratamiento de aguas residuales en Colombia es un problema prioritario a resolver (Twenergy, 2014).

La construcción de sistemas de tratamientos de aguas en Colombia es una práctica relativamente reciente. Colombia trata el 10% de las aguas residuales a pesar de contar con una capacidad instalada que alcanzaría el 20%. Según un estudio (UNESCO, 2003), menos de la cuarta parte de los municipios de 21 departamentos analizados cuentan con una planta de tratamiento de aguas residuales.

En el país existen actualmente 562 sistemas instalados en diferentes municipios del país. Lamentablemente, no todos los sistemas tratan la totalidad del agua residual producida: se estima que solo un 10% de los sistemas construidos tienen un adecuado funcionamiento. La tendencia en cuanto a sistemas de tratamiento de aguas en Colombia es la utilización de tratamientos secundarios, como la construcción de lagunas de estabilización (44%), sistemas de aireación extendida (9.4%) y filtros biológicos (7%) (Twenergy, 2014).

2.2.3 Aguas residuales a nivel regional. El municipio de Ocaña cuenta con una población aproximada de 98.229 personas según (DANE, 2005), con 19.645 viviendas con un promedio de 5 personas por hogar, siendo generadores directos de las descargas residuales, algunas de estas aguas son servidas en el alcantarillado municipal, mientras otras aportan al alto nivel de contaminación del río chiquito.

Una problemática notoria en la región es la disminución del caudal de los ríos Algodonal (alto Catatumbo) y Tejo, además de que se han convertido en depósitos de basuras propiciando la constante contaminación de la cuenca (Páez García, 2014).

El problema más relevante con respecto a los vertimientos, es tal vez el río Tejo, el cual se ha convertido en una cloaca que durante el fuerte verano lo único que arrastra son aguas servidas con excrementos, porque no se han conectado las redes de acueducto y alcantarillado. También se presentan casos en donde el tratamiento de los vertimientos se puede mejorar, como el de las aguas negras, excrementos y sangre de la planta de beneficio animal (matadero), pero no se cuenta con una planta de tratamiento adecuada.

Aunque se han implementado acciones para crear conciencia ecológica en el municipio como trabajos de reforestación, la adquisición de predios para declararlos reservas forestales y el Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado, entre otras, la problemática ambiental continúa creciendo (La opinión, 2011).

2.3 Marco contextual

El proyecto se lleva a cabo en el vivero de la Universidad Francisco de Paula Santander Sede Algodonal en Ocaña Norte de Santander, con coordenadas $8^{\circ}14'08.15''$ N y $73^{\circ}19'19.86''$ O a 1.193 msnm. En la figura 1 se observa la zonificación de la institución de educación superior. Las aguas residuales a tratar son generadas en las unidades sanitarias, laboratorios, restaurante y cafeterías, siendo conducidas a un vertimiento puntual ubicado detrás del restaurante con coordenadas $8^{\circ}14'10.09''$ N y $73^{\circ}19'16.94''$ O a 1197 msnm, optando por una solución efectiva mediante la fitorremediación para disminuir la carga contaminante de estos residuos y posibilitando su posterior uso para el riego de plantas ornamentales en el vivero, en la jardinería de la institución o simplemente que dichos efluentes puedan ser vertidos con una menor carga contaminante y dentro de los valores límites máximos permisibles por la normatividad vigente.

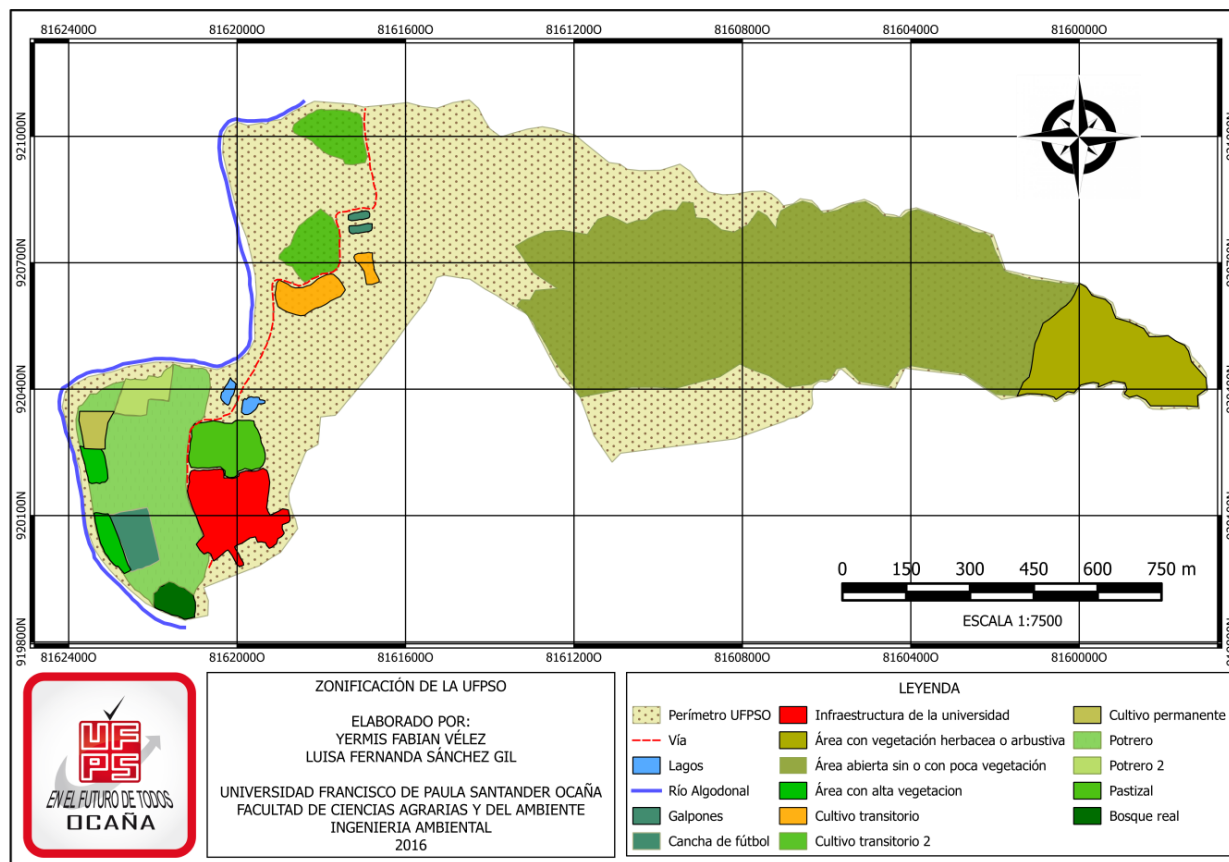


Figura 1. Zonificación de la UFPSO. La figura muestra el área de la universidad correspondiente a 115,2 hectáreas a escala 1:7500, donde se representa su infraestructura con el polígono rojo. Realizado con QGIS 2.8.7 Wien; SRC: Magna Sirgas/Colombia Bogotá Zone.

Esta alternativa de tratamiento también podría ser aplicable a nivel municipal, ya que Ocaña carece de un sistema de tratamiento para sus aguas residuales, razón por la cual vierten a cuerpos hídricos que pasan dentro de la ciudad aumentando el impacto socio-ambiental y el problema de contaminación existente en el municipio, además de ello la empresa de servicios públicos debe pagar una tasa retributiva alta por verter. En la figura 2 se observa la ubicación del municipio de Ocaña.

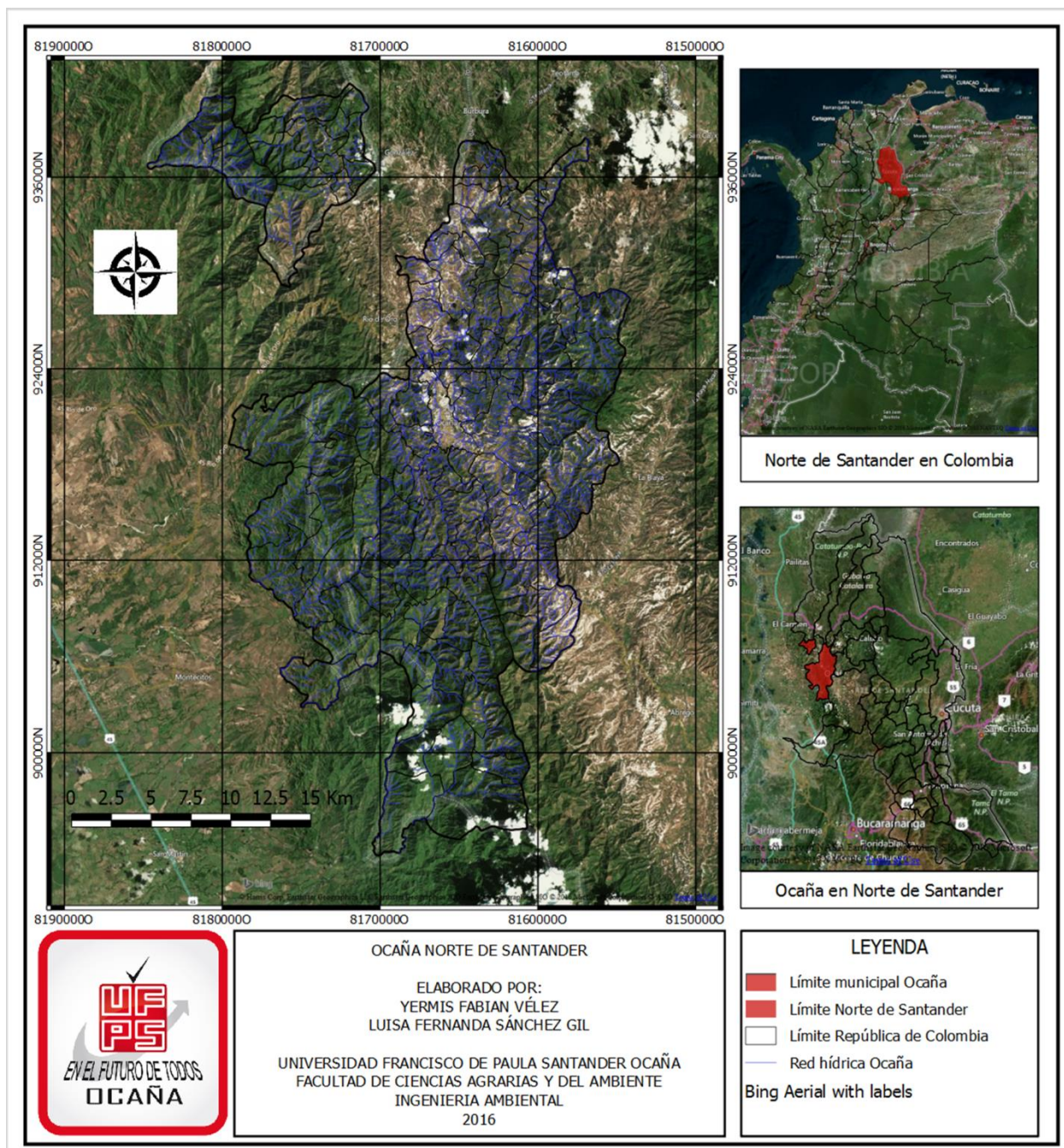


Figura 2. Ubicación geográfica de Ocaña en Norte de Santander, Colombia. Fuente: Autores, 2016.

2.4 Marco conceptual

2.4.1 Conceptos relacionados con las aguas residuales. Ya que la problemática central a solucionar en este proyecto es el tratamiento de las aguas residuales, se debe tener claro las distintas clases que existen alrededor de estas (Pérez & Camacho, 2011).

Aguas grises. Son aguas domésticas residuales compuestas por agua de lavar procedente de la cocina, cuarto de baño, fregaderos y lavaderos.

Aguas negras. Se dice que es esencialmente el agua que genera una comunidad una vez que ha sido contaminada durante las diferentes actividades que esta realiza. Entonces se puede decir que es la combinación de los residuos líquidos provenientes de las actividades domiciliarias, instituciones públicas, industriales y comerciales.

Aguas servidas. Según el ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial son los líquidos provenientes del uso doméstico, comercial e industrial (MAVDT, 2010).

Aguas residuales. Son aquellos fluidos resultantes en un sistema de alcantarillado. El gasto o agua usada por una casa, una comunidad, una granja o una industria, que contiene materia orgánica disuelta o suspendida. Las aguas residuales a su vez se subdividen de acuerdo a la actividad de proveniencia como doméstica, industrial y municipal.

Aguas residuales municipales. Son residuos líquidos originados por una comunidad, formados posiblemente por aguas residuales domésticas o descargas industriales (Pérez y Camacho, 2011).

Las aguas residuales domésticas son procedentes de las zonas de vivienda y de servicios, estas son contaminadas por el metabolismo humano y actividades domésticas, mientras que las aguas residuales industriales son vertidas desde locales utilizados para efectuar cualquier actividad comercial o industrial, que no sean aguas residuales domésticas, ni aguas de corriente pluvial (Hidritec, 2011).

Las aguas anteriormente mencionadas son vertidas y esto se define como la descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o

compuestos contenidos en un medio líquido con o sin tratamientos adecuados; se identifican los vertimientos no puntuales como aquellos en los que no se puede precisar el punto exacto de descarga al cuerpo de agua o al suelo como los de escorrentía, aplicación de agroquímicos entre otros y los vertimientos puntuales como los realizados en un medio de conducción y se puede precisar el punto exacto de la descarga, ejemplo los sistemas de alcantarillados, (MAVDT, 2010).

Muchas veces estos vertimientos poseen altos niveles de contaminantes que son identificados fácilmente por sus características físicas, químicas y microbiológicas.

2.4.2 Características físicas de las aguas residuales. Son aquellos parámetros y valores, que hacen parte del agua residual a tratar en el proyecto. Éstas características serán evaluadas antes y después del tratamiento de fitorremediación. Según (Romero & Hammeken, 2005) las principales características físicas son el color, olores, sólidos totales, temperatura, turbiedad.

Color. Las aguas residuales suelen tener un color grisáceo, pero debido a la conducción de esas aguas en sistemas de alcantarillado, tiempo de transporte y condiciones anaerobias se tornan a un color gris oscuro a negro. Su color es resultante de la formación de sulfuros metálicos que reaccionan con la liberación del sulfuro por las condiciones anaerobias de los metales.

Olores. Estos se dan por los gases liberados en el proceso de descomposición de la materia orgánica presente en el agua, es un olor desagradable por lo cual causa un rechazo a la implantación de plantas de tratamientos de aguas residuales.

Sólidos totales. Es la materia que se obtiene después de someter al agua a un proceso de evaporación a temperaturas entre 103°C y 105°C, la materia que se pierde en el proceso de evaporación no se define como sólida. Dentro de los sólidos totales hay dos clases de elementos; los sólidos sedimentables que son aquellos que se van al fondo de un recipiente y los sólidos en suspensión que son los que flotan por su peso en la superficie de la lámina de agua, estos a su vez se dividen en filtrables y no filtrables.

Temperatura. La temperatura de las aguas residuales es más elevada que las de un cuerpo de agua normal, ya que se hacen vertimientos de aguas calientes procedentes de los sectores domiciliarios e industriales.

Turbiedad. Es la propiedad de transmisión de la luz a través del agua, mediante la comparación entre la intensidad de luz dispersada en una muestra del agua residual con la intensidad registrada en una suspensión de referencia en las mismas condiciones.

2.4.3 Características químicas de las aguas residuales. Estas características juegan un papel muy importante a la hora de determinar los niveles adecuados de los principales parámetros medibles en el agua residual, a grandes rasgos las características químicas se clasifican en material orgánico y material inorgánico; el primer material es aproximadamente el 75% de los sólidos en suspensión y 40% de los sólidos filtrables que se encuentra en el agua residual, sólidos de origen animal y vegetal o relacionado con actividades humanas o síntesis de los compuestos orgánicos (Romero y Hammeken, 2005) y el material inorgánico son aquellas sustancias que no está formada en gran parte por moléculas de carbono y no es fabricada o metabolizada por los seres vivos si no que se encuentran en la naturaleza a través de reacciones químicas como las sales y los minerales (Pit Box Blog, 2009).

Mediante la medición de estas características se permite evaluar la eficiencia del sistema piloto, las más representativas son: el potencial de hidrógeno, detergentes, aceites y grasas, cloruros, nitratos, sustancias tóxicas, pesticidas, gases como el oxígeno disuelto, demanda biológica y química del oxígeno (Díaz Franky, 2014).

El potencial de hidrógeno es un coeficiente que indica el grado de acidez o alcalinidad del agua y varía dependiendo el tipo de contaminación que se presenta. El agua en óptimas condiciones debe tener un pH comprendido entre 7.0 y 7.8.

Los detergentes son los causantes de que se produzca una masa de espuma en el agua cruda y tienden a dispersar sustancias no solubles, en cambio los aceites y grasas afectan la calidad del agua, principalmente las condiciones organolépticas como el gusto.

Por otra parte, la presencia de cloruros y nitratos no es extraña en el agua, especialmente si son provenientes de pozos subterráneos donde hay infiltración de los minerales del suelo, las sustancias más comunes de estos compuestos son el cloruro de sodio o sal común y nitrógeno en forma de nitritos.

Existen sustancias tóxicas inorgánicas cuya presencia en el agua por encima de ciertos valores admisibles, tiene reconocido efecto negativo en la salud humana como son el Arsénico, Bario, Mercurio, Cianuro y la Plata.

Las aguas residuales contaminadas con pesticidas provienen de las actividades agrícolas. Se conocen bajo este nombre a compuestos orgánicos sintéticos e inorgánicos naturales, claros ejemplos son los insecticidas, fungicidas, alguicidas, entre otros.

Los gases que se encuentran con mayor frecuencia en el agua son el oxígeno (O_2), el nitrógeno (N_2), el dióxido de carbono (CO_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), el metano (CH_4) y el amoníaco (NH_3) (Romero y Hammecken, 2005).

Frecuentemente se usa el carbono orgánico total como indicador no específico de la calidad del agua.

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) mide el oxígeno disuelto utilizado por los microorganismos en la oxidación bioquímica de la materia. El periodo de incubación tras el cual se realiza la medición suele ser de 5 días, comparándose el valor obtenido con el original presente en la muestra. Se determina así la cantidad aproximada de oxígeno utilizado que se requerirá para degradar biológicamente la materia orgánica (Pérez y Camacho, 2011).

La demanda química de oxígeno (DQO) mide el oxígeno disuelto requerido para oxidar la materia mediante un agente químico. Mide la cantidad de materia orgánica total tanto biodegradable como no biodegradable (Pérez y Camacho, 2011).

La cantidad de oxígeno que está disuelto en el agua se conoce como oxígeno disuelto (OD). Es un indicador de cuan contaminada está el agua o de lo bien que puede dar soporte esta agua a la vida vegetal y animal. Generalmente, un nivel más alto de oxígeno disuelto

indica agua de mejor calidad. Si los niveles de oxígeno disuelto son demasiado bajos, algunos peces y otros organismos no pueden sobrevivir (González, 2011).

2.4.4 Características microbiológicas de las aguas residuales. Son los microorganismos y organismos presentes en el agua residual, estos muchas veces nos sirven de referencia e indicador del tipo de contaminante que presentan estas aguas y son altamente peligrosos para la salud de los seres vivos, entre estas características tenemos:

Microorganismos. Son organismos que por su pequeño tamaño, son imperceptibles al ojo humano y se necesita de un microscopio para poder verlos, en este grupo se incluyen bacterias, mohos, protozoos, algunas algas y virus.

Organismos patógenos. Es toda entidad biológica capaz de producir enfermedades o daños a la biología de un huésped (Ecured, 2011). Entre los organismos patógenos presentes en las aguas residuales están las bacterias, virus y protozoarios.

Organismos indicadores. Es un organismo que por medio de su presencia permite identificar o determinar la existencia de un organismo patógeno, normalmente se utilizan para determinar el grado de contaminación de las aguas, entre algunos organismos indicadores en las aguas están los coliformes totales, coliformes fecales y enterococos (Rivera, Maldonado, & Rios, 2001).

Vector. Cualquier organismo vivo no microbiano que comience su ciclo de vida en el agua contaminada o no contaminada y que actúa como transmisor de enfermedades de un organismo a otro (SENA y Ministerio de desarrollo económico, 1999).

2.4.5 Características de los humedales artificiales. Ya se explicaron los conceptos que se relacionan con el agua, a continuación se abordaran los temas relacionados con los humedales artificiales y las plantas a utilizar en él.

Humedales construidos. Son sistemas de tratamiento basados en los procesos naturales y las interacciones entre el suelo, agua plantas, microorganismos y una fuente de

energía que mueve los procesos que allí se dan, para este caso energía solar (Quintero J. V., 2014). Los humedales se caracterizan por tener un lecho filtrante, suelo o sustrato, saturado de agua residual en el cual se encuentran especies vegetales especialmente macrófitas y animales en constante actividad.

Para el tratamiento de aguas residuales existen dos tipos de humedales artificiales (H.A), uno de flujo superficial y otro de flujo subsuperficial.

H.A de flujo superficial: se caracterizan porque la superficie del agua está expuesta a la atmósfera y el fondo constituido por suelo relativamente impermeable, o con una cubierta impermeable, vegetación emergente y niveles de agua poco profundos que oscilan entre 0.1 y 0.6 metros (Árias Martínez, Betancur Toro, Gómez Rojas, Salazar Giraldo, & Hernández Ángel, 2010). A su vez este tipo de humedales se divide según la profundidad de las macrófitas, ya sean flotantes o sumergidas.

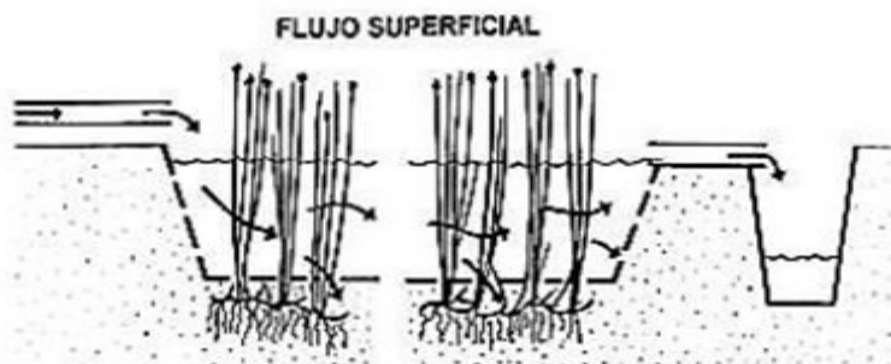


Figura 3. Humedal superficial. Fuente: (Brix, 2014).

Este tipo de humedal por sus características de diseño, brinda un ambiente propicio para la creación de nuevos hábitats para la fauna y flora ya que existe una interacción entre las aves acuáticas, especies vegetales y pequeños organismos presentes en el agua, mejora las condiciones de humedales naturales próximos a este (Lara Borrero, 1999).

H.A de flujo subsuperficial: a diferencia de los humedales superficiales, las plantas se siembran en el lecho filtrante o suelo y el agua contenida en el permanece en un nivel igual o más bajo del suelo, es decir, va a estar a ras del medio filtrante, de manera que el agua residual no va a tener contacto con el tallo y hojas de la especie vegetal. Por sus

características este tipo de humedal es de fácil operación, el agua obtenida después del tratamiento puede ser usada nuevamente ya que gracias a la función de las plantas y microorganismos presentes, ayudan a la depuración y eliminación de sólidos suspendidos, materia orgánica, agentes patógenos y transformación de nitrógeno y fósforo, además la presencia de plagas es mínima y no se presenta malos olores en los lechos (Árias Martínez et al., 2010).

Los humedales subsuperficiales se dividen a su vez por la forma en que el flujo de agua ingresa al humedal.

En los humedales subsuperficiales de flujo horizontal el agua circula lentamente desde la entrada del humedal, pasando por el medio filtrante hasta llegar a la superficie del mismo para la recolección de las aguas.

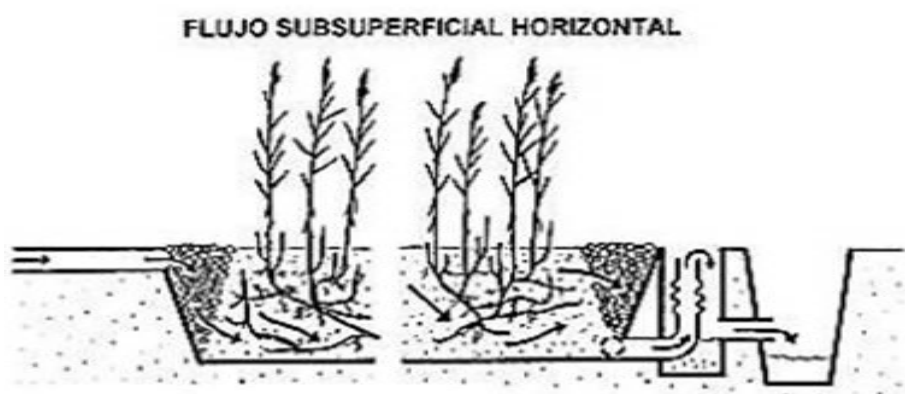


Figura 4. Humedal subsuperficial de flujo horizontal. Fuente: (Brix, 2014).

En los humedales subsuperficiales de flujo vertical el agua se distribuye de manera uniforme sobre la superficie del medio filtrante y percolan verticalmente hacia la parte inferior del humedal donde se encuentra la zona de recolección (Árias Martínez et al., 2010).

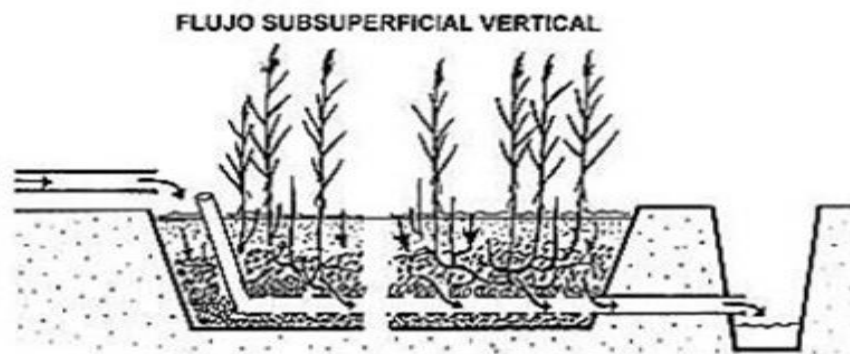


Figura 5. Humedal subsuperficial de flujo vertical. Fuente: (Brix, 2014).

Como se explicará más adelante, en el humedal artificial se plantan especies vegetales que van a ayudar a la descontaminación de las aguas residuales a través de principios como:

Biorremediación: es una tecnología que utiliza el potencial metabólico de los microorganismos, principalmente bacterias pero también hongos y levaduras para transformar contaminantes orgánicos en compuestos más simples poco o nada contaminantes, logrando así limpiar terrenos o aguas contaminadas (Nikaido, 1995).

Fitorremediación: Se define como el uso de plantas o material vegetal para destruir, eliminar o transformar contaminantes del suelo, agua y aire (Panich-Pat, Upatham, Pokethitiyook, Kruatrachue, & Lanza, 2010). Los mecanismos usados por las plantas para descontaminar los cuerpos hídricos son:

Fitodegradación: Uso de plantas y microorganismos asociados para degradar contaminantes orgánicos.

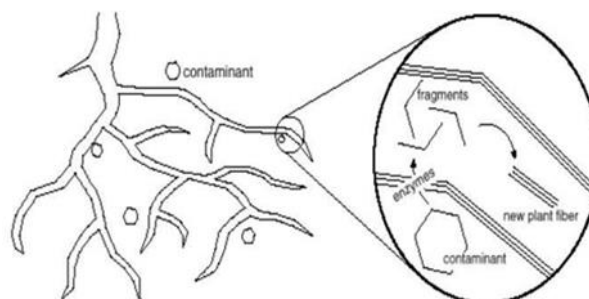


Figura 6. Proceso de fitodegradación. Fuente: (Anónimo, 2016).

Fitoestabilización o fitoinmovilización: Las plantas tolerantes a metales se usan para reducir la movilidad de los mismos y evitar el paso a napas subterráneas o al aire.

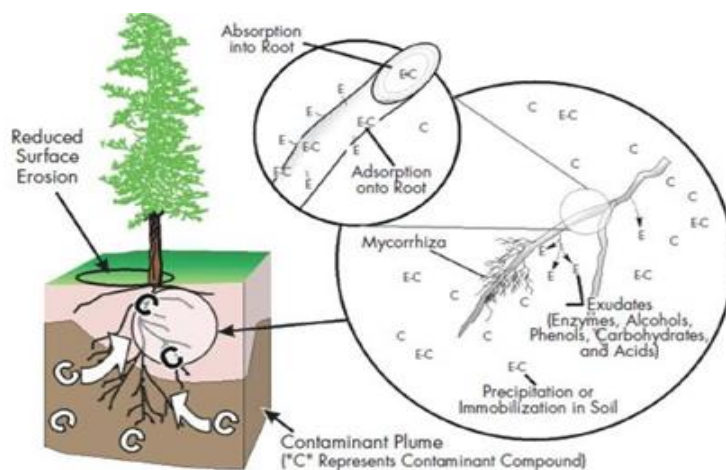


Figura 7. Proceso de fitoestabilización. Fuente: (Anónimo, 2016).

Fitoextracción: uso de plantas acumuladoras de elementos tóxicos o compuestos orgánicos para retirarlos del suelo mediante su absorción y concentración en las partes cosechables.

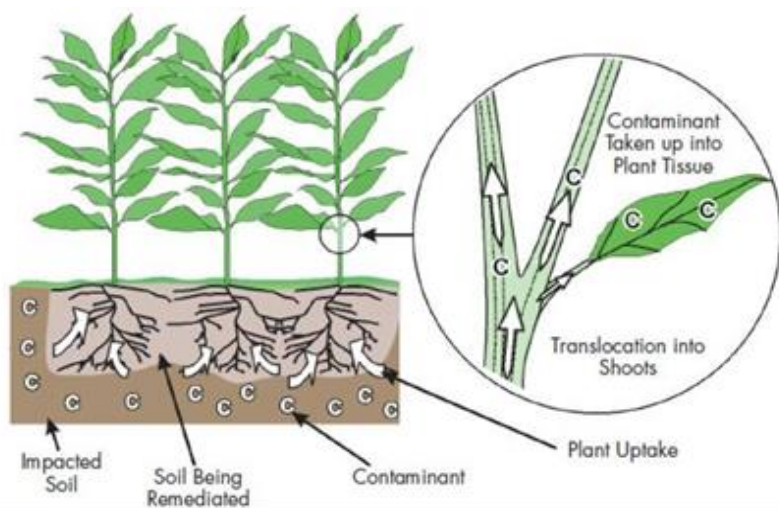


Figura 8. Proceso de fitoextracción. Fuente: (Anónimo, 2016).

Fitovolatilización: las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera a través de la respiración.

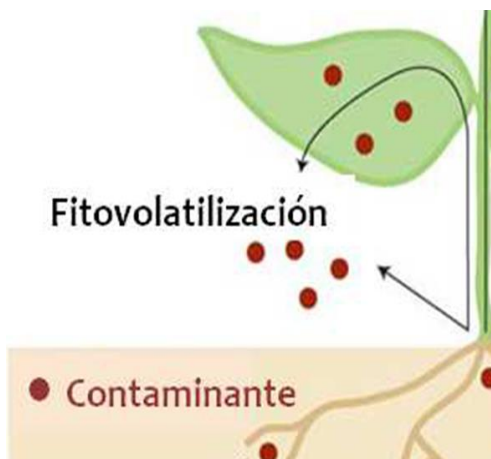


Figura 9. Proceso de fitovolatilización. Fuente: (Pilon-Smits, 2005).

Rizofiltración: Uso de las raíces para absorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos.

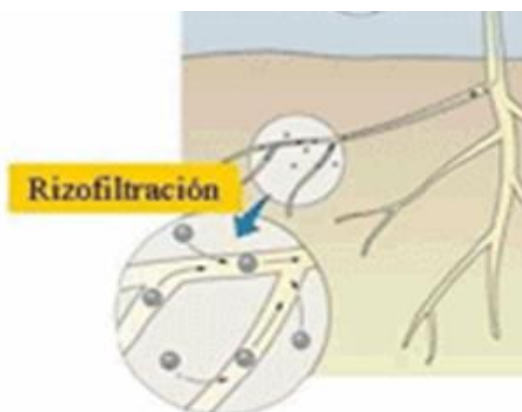


Figura 10. Proceso de rizofiltración. Fuente: (Argenbio, 2007).

En la tabla 1 se muestra en detalle los procesos llevados a cabo por las plantas para la descontaminación, las plantas utilizadas y las sustancias tratadas.

Todo este proceso se da gracias a las características fisiológicas de algunas plantas como el tipo de raíces, grosor de tallos, características de las hojas, entre otras. A estas especies las llamaremos plantas hiperacumuladoras, porque son plantas capaces de acumular o absorber elementos inorgánicos a niveles cien veces más altos que el ambiente circundante y que otras especies creciendo bajo las mismas condiciones ambientales (Peña, Madera, & Sánchez, 2013).

Tabla 1*Mecanismos de fitorremediación*

FITOTECNOLOGÍA	PROCESO INVOLUCRADO	CONTAMINACION TRATADA	PLANTAS TÍPICAS
FITOEXTRACCIÓN (Suelo, sedimentos, aguas residuales, lodos)	Las plantas se usan para concentrar principalmente metales en las partes cosechables (parte aérea). Las plantas importantes para la fitoextracción de metales pesados son denominadas hiperacumuladoras ya que tienen una gran tolerancia a éstas sustancias y pueden absorberlas en grandes cantidades.	Metales (Ag, Cd, Co, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn); radioisótopos (90Sr, 137Cs, 239Pu, 238U, 234U); no metales (As, B).	Girasol, Mostaza de la India, Nabos, Cebada, Lúpulo, Crucíferas, Ortigas, Diente de León.
FITOESTABILIZACIÓN (Suelo, sedimentos y lodos)	Las plantas tolerantes a metales se usan para reducir la movilidad de los mismos y evitar el pasaje a napas subterráneas o al aire. Este principio es usado cuando se plantan coberturas vegetales en sitios conteniendo contaminantes orgánicos o inorgánicos; o cuando se usan árboles como barreras hidráulicas para permitir el filtrado de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Se requiere un aporte de fertilizantes y adecuación del suelo.	Lagunas de deshecho de yacimientos mineros. Propuesto para fenólicos y compuestos clorados.	Álamos
FITOESTIMULACIÓN (Agua y suelo)	Las raíces secretan exudados (enzimas y ácidos orgánicos, entre otros) que estimulan el crecimiento de diversas bacterias y hongos en la rizósfera. Estos microorganismos pueden tener diversas características biorremediadoras.	Hidrocarburos derivados del petróleo y poliaromáticos, benceno, tolueno, atrazina, etc.	Liberadoras de compuestos fenólicos (mora, manzano); Pastos con raíces fibrosas (hasta 1 m de profundidad); Árboles freatófitos (hasta 3 m de profundidad)

Tabla 1. Continuación

<p>FITOTRANSFORMACIÓN</p> <p>Comprende los procesos de fitodegradación y fitovolatilización.</p>	<p>FITODEGRADACIÓN</p> <p>Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos. Las plantas pueden desarrollar una serie de reacciones para metabolizar o mineralizar compuestos orgánicos.</p>	<p>Municiones (TNT, DNT, RDX, nitrobenzeno, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitrilos, etc.</p>	<p>Árboles freatófitos; Pasturas; Leguminosas</p>
<p>RIZOFILTRACIÓN</p> <p>(agua subterránea extraída, agua superficial y agua residual)</p>	<p>FITOVOLATILIZACIÓN</p> <p>Las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración. Los compuestos liberados a la atmósfera pueden ser más fácilmente degradados.</p>	<p>Mercurio, selenio y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano)</p>	<p>Plantas acuáticas emergentes y plantas acuáticas sumergidas</p>
<p>RIZODEGRADACIÓN</p>	<p>Similar a la fitodegradación pero aquí los hongos y las bacterias que habitan en el suelo alrededor de las raíces de las plantas son los encargados de degradan los contaminantes.</p>	<p>Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc isótopos radioactivos, compuestos fenólicos</p>	

Nota. En la tabla se muestran los procesos llevados a cabo por las plantas para la descontaminación, las plantas utilizadas y las sustancias tratadas. Fuente: (Anónimo, 2016).

2.5 Marco teórico

2.5.1 Estudios sobre la problemática. Desde tiempos antiguos se han generado residuos líquidos que son producidos por las comunidades al suplir sus necesidades, estos vertimientos se hacen a los cuerpos de aguas cercanos, afectando la calidad del recurso y contaminando el ecosistema de su alrededor. En Colombia la inadecuada recolección, tratamiento y disposición de las aguas residuales han generado una creciente problemática de contaminación ambiental y sanitaria principalmente en las fuentes de abastecimiento de aguas, limitando así la disponibilidad del recurso hídrico y restringiendo su uso en el país (MAVDT, 2001).

Según datos del MAVDT (2001), hoy llamado ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible de Colombia indican que un 95% de las aguas residuales domésticas y aguas residuales agrícolas son vertidas sin ningún tipo de tratamiento y un 85% de las aguas residuales industriales tampoco reciben tratamiento antes de ser vertidas a los cuerpos hídricos o sistemas de alcantarillado.

En Colombia existen 235 PTAR's construidas y más del 50% presentan mala operación por causas de origen técnico, financiero, ambiental y político. En el municipio de Ocaña no existe una planta de tratamiento para aguas residuales, por lo tanto se propone un sistema piloto de descontaminación de estas aguas residuales en la Universidad Francisco de Paula Santander para así realizar las pruebas necesarias y poder sugerir implementarla a nivel regional, nacional y/o global. Se quiere implementar este sistema de descontaminación a partir de un método biológico como la fitorremediación.

2.5.2 Efectos del problema. Una mala operación y tratamiento de las aguas residuales incide negativamente en muchos aspectos medioambientales especialmente en las matrices de agua, suelo, flora, fauna y componente social. A continuación se nombran las principales afectaciones que trae consigo el vertimiento de aguas contaminadas al ambiente.

La generación de olores ofensivos, es una situación que afecta al componente aire, disminuye la calidad de vida de la población y desvaloriza terrenos donde se presenta dicha problemática.

Por otra parte, se deteriora la calidad del recurso hídrico, ya que se transfiere al agua una gran cantidad de nutrientes como nitrógeno, fósforo, entre otros, causando eutrofización y con ello un crecimiento exagerado de algas, plantas acuáticas y fitotoxinas, disminuyendo el oxígeno del cuerpo acuático y asfixiando la biota acuática. También existen compuestos orgánicos, metales, y químicos que afectan en la calidad y cantidad de alimento de los seres vivos, alterando la flora y fauna circundante con la proliferación de parásitos, reducción en la talla de crecimiento de las especies y muerte de organismos más sensibles (Noyola, 2010). La tabla 2 presenta la relación del contaminante con el efecto que causa al medio.

Tabla 2

Características de los principales compuestos del agua residual

CONTAMINANTES	CARACTERÍSTICAS / EFECTOS
Sólidos suspendidos	Pueden dar lugar a depósitos de lodo y por tanto condiciones anaerobias cuando el agua residual sin tratar se descarga en un ambiente acuático.
Materia orgánica biodegradable	Proteínas, carbohidratos y grasas. Se miden en términos de DBO ₅ y DQO. Su estabilización biológica da lugar al consumo del oxígeno natural y al desarrollo de condiciones sépticas.
Patógenos	Transmisión de enfermedades.
Nutrientes	El nitrógeno y fósforo son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se descargan a un ambiente acuático, pueden dar origen al crecimiento excesivo de algas (eutrofización del cuerpo receptor)
Material orgánico refractario	Compuestos orgánicos que tienden a resistir métodos convencionales de tratamiento de agua, por ejemplo, surfactantes, fenoles y pesticidas agrícolas.

Tabla 2. Continuación

Contaminantes peligrosos	Compuestos orgánicos e inorgánicos conocidos por sus características de carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o alta toxicidad.
Metales pesados	Provenientes de actividades industriales y comerciales. As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn.
Sólidos inorgánicos disueltos	Son constituyentes inorgánicos como calcio, sodio y sulfatos.

Nota: En la tabla se describen las características y/o efectos generados por los contaminantes presentes en el agua. Fuente: (Noyola, 2010).

La alteración en los procesos biológicos es de mucha importancia ya que de esta depende el equilibrio y la capacidad de regeneración del ambiente (Noyola, 2010), si existe un cambio en el hábitat, los primeros en sentir esas condiciones son los seres vivos, los cuales son obligados a adaptarse, desplazarse del sitio o morir. Si el ecosistema pierde la capacidad de albergar seres vivos, es porque no está brindando los elementos suficientes para equilibrarse y crea la oportunidad de ser invadido por especies que no son propias del lugar e indican una mala salud del biotopo.

Si ocurre lo anterior se presenta una desvalorización de los terrenos circunvecinos porque hay una alteración del paisaje y entorno ambiental, proliferación de vectores, afectación a la flora y fauna y disminución en su estructura ecológica.

La calidad de vida de las personas se ve afectada, ya que muchos seres humanos dependen de lo que produce el medio acuático; además se presentan problemas sanitarios, higiénicos y de salud, al consumir y tener contacto con aguas contaminadas poniendo en riesgo sus vidas. La contaminación de este recurso, en su mayoría proveniente de las actividades humanas, propicia enfermedades de origen hídrico como se muestra en la tabla 3, estas aguas perjudican a la población que no tiene acceso al agua potable y la utilizan para realizar sus actividades diarias.

Entre las enfermedades más comunes están: la diarrea, la hepatitis A y E, la poliomielititis, la fiebre tifoidea y la meningitis, de estas afecciones las más común es la de tipo diarreica, ya sea bacteriana, viral o por protozoos. Otro tipo de enfermedades se

produce por origen vectorial como la malaria, fiebre amarilla, dengue, la leishmaniasis, filariosis de Bancroft, entre otras; por último se tienen las enfermedades causadas por la falta de higiene que prosperan en condiciones insalubres o donde el agua no recibe el tratamiento apropiado y se ven impedidas las actividades de limpieza corporal y general, causando dermatitis, tracoma, lepra, tuberculosis entre otras (Tolcachier, 2004).

Tabla 3

Principales enfermedades causadas por el agua

ENFERMEDAD	AGENTE CAUSAL	OBSERVACIÓN
Dengue	<i>Aedes aegypti</i>	Enfermedad causada por un virus producido en aguas contaminadas y transmitida por el mosquito de Aedes.
Diarrea	Ingestión de agua contaminada	Diarrea es un síntoma de infección debido a huéspedes bacteriales, virales y organismos parásitos la mayoría de los cuales se pueden extender por medio de agua contaminada.
Hepatitis	Ingestión de agua o comida contaminada y contacto a personas.	En medicina, la hepatitis es una enfermedad que produce una inflamación del hígado. Existen 2 virus que causan hepatitis (hepatitis A y E).
Cólera	Vibrión colérico	La principal vía de transmisión del Vibrio Cholerae es la ingestión de agua o alimentos contaminados con dicho virus. Con menor frecuencia se han detectado también traspaso de virus por contacto de persona a persona.
Gastroenteritis	Norovirus	Se disemina a través de alimentos o agua que estén contaminados y el contacto con una persona infectada. La mejor prevención es lavarse las manos frecuentemente.

Nota. La tabla muestra las principales enfermedades causadas por el agua en Ocaña norte de Santander. Fuente: Autor, 2016.

2.5.3 Estudios sobre fitorremediación. La utilización de plantas para tratar contaminantes es un tema relativamente nuevo, ya que el término fitorremediación empieza a usarse hasta mediados de los años noventa. Se han estudiado los mecanismos de las plantas como la fitoextracción, fitoestabilización, rizofiltración, fitoestimulación, fitovolatilización y fitodegradación para el tratamiento de cada sustancia contaminante.

Cada mecanismo difiere de los demás en cuanto al tipo de contaminantes que controla, absorbe, degrada, elimina o metaboliza, pero principalmente por la característica del proceso y por la parte física de la planta que interviene en él. En la figura 11 se observan los mecanismos de la fitorremediación.

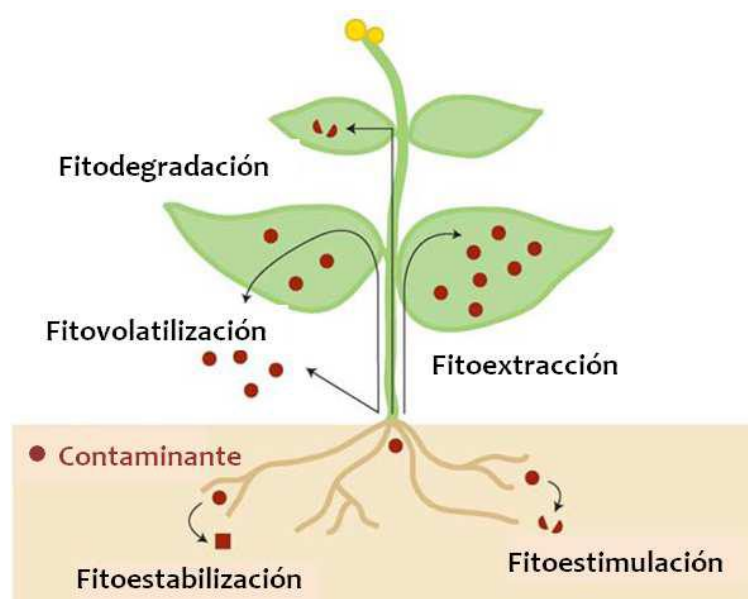


Figura 11. Mecanismos de la fitorremediación. Fuente: (Pilon-Smits, 2005).

Se ha demostrado que estos mecanismos pueden remover eficientemente fosfatos, nitratos, fenoles, pesticidas, metales pesados, elementos radiactivos, fluoruros, bacterias y virus, de aguas residuales municipales, agrícolas e industriales, incluyendo las industrias lechera, de pulpa y papel, textil, azucarera, de curtiduría, destilería, aceitera, galvanizado y metalurgia (López, 2009).

Algunos ejemplos referenciales del uso de la rizofiltración para el tratamiento de agua contaminada con petróleo se tienen en Virginia (USA), donde se utilizaron plantas de pasto y trébol. En la India se aplicó para el tratamiento de agua contaminada con cadmio,

plomo y níquel empleando raíces de mostaza, geranio y girasol. Esta técnica se ha aplicado incluso para el tratamiento de agua con residuos radiactivos en Chernóbil (Ucrania), donde se usaron plantas de girasol. Se considera sin embargo que la rizofiltración está aún en fase de investigación (Mejía, 1997).

La fitorremediación se define como el uso de plantas para eliminar, destruir o transformar contaminantes del suelo, agua y aire (Panich-Pat et al., 2010). En este proceso, las plantas son seleccionadas principalmente por su potencial fisiológico, como en el caso de enzimas presentes para tolerar y asimilar sustancias tóxicas, por sus tasas de crecimiento, por la profundidad de sus raíces y su habilidad para bioacumular y/o degradar contaminantes.

A nivel nacional, un estudio realizado por Aulestia Aguilar (2012) en la universidad del Valle sugiere el uso de las plantas *Heliconia psittacorum*, *Colocasia esculenta* y *Cyperus haspan*, para el tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario a través de un humedal artificial. Se estudiaron las características fisiológicas de la planta, su capacidad de producir clorofila y efectos sobre el potencial hídrico. Entre las conclusiones más importantes de este trabajo están:

Al comparar los datos obtenidos para *H. psittacorum* para las variables fisiológicas se obtuvo que no hubo marcadas diferencias entre el control y al tratamiento al riego con lixiviado, lo que le permitió adaptarse a las cargas de contaminantes presente en el lixiviado.

C. haspan mostró diferencias significativas en las respuesta fisiológicas lo que sugiere intolerancias para adaptarse al riego con lixiviado.

Los resultados del estudio en relación con las respuestas fisiológicas de *H. psittacorum* y *C. esculenta* sugieren una tolerancia al tratamiento con lixiviados.

Los resultados obtenidos muestran un posible potencial fitorremediador de las especies vegetales tratadas y su posible uso en humedales construidos para el tratamiento de lixiviados.

2.5.4 Estudios sobre las plantas utilizadas. En esta investigación se quiere utilizar las plantas *Heliconia psittacorum* y *Costus spicatus* para el tratamiento de las aguas residuales de la UFPSO, ya que son especies que se dan muy bien en la región y por sus propiedades fisiológicas como la profundidad de sus raíces, grosor del tallo, características de las hojas, el mecanismo en que asimilan los nutrientes, sugieren un alto potencial fitorremediador.

La especie *H. psittacorum* que se muestra en la figura 12, es propia de las zonas tropicales y su uso es muy reconocido para la ornamentación. Colombia es el país con mayor diversidad de especies en el género *Heliconias* con 94 especies.

Para la heliconia se evaluó su tolerancia a las aguas residuales con altas cargas contaminantes como lixiviados de rellenos sanitarios (Aulestia Aguilar, 2012), resultando tener gran capacidad de adaptación al medio sin alteración de sus características fisiológicas, además se sugiere la evaluación de su posible potencial fitorremediador. También estudios recientes han evaluado el papel remediador de esta planta en aguas residuales encontrando efectos positivos en biorremediación a partir de su capacidad de eliminar la DBO₅, DQO y SST, por encima del 70% de remoción sin detrimento de sus características fisiológicas; además, Peña, Madera y Sánchez (2013) plantean la necesidad de ampliar la evaluación del desempeño de especies nativas. La necesidad de realizar proyectos efectivos para el control de la contaminación por las aguas residuales, muestra que los humedales construidos son una alternativa costo-efectiva ideal para este propósito.

CLASIFICACIÓN	
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Zingiberales
Familia	Heliconiaceae
Género	Heliconia
Especie	<i>Heliconia psittacorum</i>




Figura 12. Clasificación taxonómica de la especie *H. psittacorum*. Fuente: (Mazza, 2007).

Esta especie herbácea es erecta rizomatosa perenne, aproximadamente de 0,8-1,5 m. de altura. Las hojas se encuentran sobre un pecíolo largo 25 cm, son basales, alternas, simples, enteras, de forma elíptico-lanceoladas a oblongo-lanceoladas con ápice en punta y nervadura central prominente, de 35-55 cm de longitud y 4-12 cm de anchas, de color verde intenso brillante superiormente, más claro inferiormente, y bases foliares tubulares envolventes que forman un pseudotallo de cerca 2,5 cm de diámetro (Mazza, 2007).

La inflorescencia está sobre un pedúnculo largo de 15-55 cm, es una espiga terminal erecta larga (6-12 cm) con raquis levemente ondulado, generalmente de color naranja y 3-7 brácteas alternas, lanceoladas, cóncavas, cerosas, ligeramente espaciadas, de color rojo o rojo naranja brillante. Las brácteas subtenden 3-9 flores, sobre un pedicelo largo 1,6-1,8 cm, tubulares, normalmente de color naranja con mancha verde oscuro hacia el ápice, de 3-5 cm de largo. Las flores, en simetría bilateral, son hermafroditas, con 3 sépalos, de los cuales dos fusionados y uno libre, y 3 pétalos fusionados juntos, poco diferenciados entre ellos, 5 estambres fértiles y un estaminoide opuesto al sépalo libre. Los frutos son drupas subglobosas de color inicialmente de amarillo a naranja, luego azul oscuro brillante en su madurez, de cerca 0,8 cm de diámetro, conteniendo 1-3 semillas.

La *H. psittacorum* tiene una altura media de 1 metro, para su esparcimiento ocupa rápidamente el espacio disponible porque el rizoma crece mucho horizontalmente antes de brotar un nuevo vástago (Instituto Colombiano Agropecuario, 2012).

El cultivo de las heliconias usualmente se asocia a la floristería y ornamentación (Jerez-Mompié, 2007), para fines de comercialización de la flora se recomienda que la *H. psittacorum* sea plantada con densidad de 1 planta por cada 1,5 m². La cantidad de agua depende de la incidencia lumínica, de los requerimientos del cultivar y de la época del año. Esta especie requiere 1 mL de agua diario cuando está sembrada en suelo bien drenado, 2,5 mL en suelos más compactos y hasta 7 litros por planta en producción, en épocas de verano (Sosa Rodríguez, 2013).

Una densidad de siembra referida por otro autor para la *H. psittacorum* es de 12.000 plantas por hectárea (1 planta por 0,83 m²). La geometría de crecimiento de esta especie tiene forma bastante extendida (Ospina Jaramillo & Piñeros Cifuentes, 2006).

La especie *Costus spicatus* mostrada en la figura 13, es una planta de las regiones tropicales, autóctona de la región tropical y es considerada medicinal. Esta planta no tiene estudios relacionados con fitorremediación, pero por sus características fisiológicas se supone un buen potencial para este fin. Se propaga muy bien en climas húmedos por lo tanto es una planta que puede sobrevivir a un medio acuático a través de un humedal construido, donde se le brinda un lecho de soporte para penetrar sus raíces.

Conocida con el nombre común de caña agria, es una planta herbácea de hasta 1 metro de altura, tallos carnosos de color verde, sus hojas simples ordenadas en una forma helicoidal sobre el eje del tallo, dando la idea de una escalera de caracol, inflorescencia rodeada de hojas de color rojo o naranja, colocada en el ápice terminal de la planta. Se le encuentra en forma silvestre en los estratos inferiores de las selvas altas y medianas perennifolias de la América tropical (Maldonado-Mares, 2005). Se reproduce por sus nódulos o esquejes y se puede sembrar directamente, se recomienda ser sembrada en un suelo fértil preferiblemente franco y mantener un riego moderado.

La *C. spicatus* posee un tallo que es usado generalmente con propósitos medicinales en el tratamiento de infección renal (Magaña Alejandro, Gama Campillo, & Mariaca Méndez, 2010), de diabetes usando el extracto de la planta (Ajithabai et al., 2011) y como calmante de los dolores y la regulación menstrual (Ducharme, 2013). Precisamente es en el campo de la medicina donde se ha realizado investigaciones sobre esta especie (Duke, 2008).

Por el contrario no se encontró ninguna investigación sobre su tolerancia fisiológica a las aguas residuales, ni el potencial fitorremediador de la planta; en la fase de evaluación se analiza dicha tolerancia y su remoción de carga contaminante.

CLASIFICACIÓN	
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Zingiberales
Familia	Costaceae
Género	Costus
Especie	Costus <i>spicatus</i>



Figura 13. Clasificación taxonómica de la especie *C. spicatus*. Fuente: (Umber, 2008).

Como se ha mencionado, las dos especies vegetales están presentes en la región, lo que se convierte en una notoria ventaja para la realización del proyecto, permitiendo una mayor accesibilidad en la recolección de las plantas.

2.6 Marco legal

A partir de la promulgación de la nueva Constitución Política (1991), el manejo de los recursos naturales y del medio ambiente ha sido dotado de diferentes herramientas a nivel regional y estatal, que permite tomar decisiones y trazar políticas ambientales, amparadas en la legislación ambiental. Dicha constitución incluye los siguientes artículos:

Artículo 8: Es obligación del estado y de las personas proteger las riquezas naturales y culturales de la nación.

Artículo 79: Toda persona tiene derecho a gozar de un ambiente sano. Es deber del estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica.

Artículo 313: Todo municipio debe expedir los acuerdos necesarios para el control, preservación y defensa del patrimonio ecológico.

Dentro de la normatividad que busca la conservación, manejo y protección del recurso hídrico también encontramos la siguiente:

Ley 99 de 1993: Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA).

Ley 9 de 1979: Código sanitario nacional.

Decreto 2811 de 1974: Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

Decreto 1449 de 1997: Disposiciones sobre conservación y protección de aguas, bosques, fauna terrestre y acuática.

Decreto 3930 del 25 de octubre de 2010: Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo 11 del Título VI del decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.

El presente decreto establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el ordenamiento del recurso hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados.

Decreto 4728 del 23 octubre de 2010: Por el cual se hacen algunas modificaciones al decreto 3930 de 2010, en especial a la fijación de la norma de vertimientos, el protocolo para el monitoreo de los vertimientos en aguas superficiales y subterráneas, y sobre el plan de reconversión a tecnologías limpias en gestión de vertimientos.

Decreto 3200 del 29 de agosto de 2008: Por el cual se dictan normas sobre Planes Departamentales para el Manejo Empresarial de los Servicios de Agua y Saneamiento y se dictan otras disposiciones.

Son un conjunto de estrategias de planeación y coordinación interinstitucional, formuladas y ejecutadas con el objeto de lograr la armonización integral de los recursos, y la implementación de esquemas eficientes y sostenibles en la prestación de los servicios públicos domiciliarios de agua potable y saneamiento básico.

Decreto 1594 de 1984: Usos del agua y residuos líquidos. Capítulo IV de los criterios de calidad para destinación del recurso teniendo en cuenta parámetros específicos del recurso hídrico, además se consideran las sustancias de interés sanitario (Artículo 20).

Decreto 0075 del 24 de enero de 2011: Por el cual se adopta el formato del reporte sobre el estado de cumplimiento de la norma de vertimiento puntual al alcantarillado público.

Se toma como base este documento para la realización de un nuevo formato en donde se reporte el estado del recurso para cada muestra que se realice durante el proyecto, ya sea antes o después del sistema de tratamiento piloto.

Resolución 151 del 2 de marzo de 2001: Comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico.

Las disposiciones contenidas en la presente resolución aplican a los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo; a las actividades complementarias de éstos y a las actividades que realizan los prestadores de los mismos en los términos de la ley 142 de 1994.

Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015: Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

Igualmente se establecen los parámetros objeto de análisis y reporte por parte de las actividades industriales, comerciales o servicios.

Decreto 3100 del 30 de octubre de 2003: Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones.

Decreto 303 del 6 de febrero de 2012: El presente decreto reglamenta el Registro de Usuarios del Recurso Hídrico para el componente de concesión de aguas y el componente de autorizaciones de vertimientos.

Dentro de la universidad se debe contar con la autorización de vertimiento, que a su vez comprende el permiso de vertimiento, plan de cumplimiento y plan de saneamiento y manejo de vertimientos.

Resolución 1303 del 17 de abril de 2008: Por la cual se adopta un método para análisis microbiológico de aguas para consumo humano validado por el Instituto Nacional de Salud.

NTC-ISO 5667-10: Calidad de agua. Muestreo. Muestreo de aguas residuales.

GTC 31: Guía para la realización de pruebas de toxicidad.

Capítulo 3: Diseño Metodológico

3.1 Tipo de Investigación

Kerlinger (2002), concibe la investigación científica como un conjunto de procesos sistemáticos y empíricos que se aplican al estudio de un fenómeno, en tanto Garza (2010) la considera dinámica, cambiante y evolutiva.

En este caso la investigación se centra en diseñar un sistema de descontaminación y evaluarlo para mitigar los impactos negativos generados por las aguas residuales. La investigación se puede manifestar de tres formas: cuantitativa, cualitativa y mixta (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010), dentro de los cuales este proyecto tiene cabida en el enfoque cuantitativo, ya que las mediciones de los parámetros de las aguas residuales, tanto antes como después del tratamiento, son resultados de carácter numérico, y con ellos se calculan los contaminantes removidos y finalmente el porcentaje de remoción del sistema de tratamiento.



Figura 14. Fases en el proceso cuantitativo. Fuente: (Hernández Sampieri et al., 2010)

Se define el enfoque de este proyecto como una investigación cuantitativa, este a su vez tiene diferentes alcances: exploratorio, descriptivo, correlacional y explicativo. Algunas investigaciones pueden tener más de un alcance, como en este caso en donde el proyecto es descriptivo, buscando especificar las propiedades, características y perfil del proceso de fitorremediación que sometemos a análisis; y también correlacional, pues la

finalidad es conocer la relación entre las variables que se definen más adelante y que asociaremos.

Esta investigación según el propósito o finalidad perseguida se clasifica como investigación aplicada, pues el mayor interés es conocer primordialmente las consecuencias prácticas y mediante la cual pretendemos resolver un problema: el de los vertimientos sin tratamiento.

El diseño metodológico adopta la investigación experimental, es decir, que para la evaluación del sistema piloto, se manipulan intencionalmente diferentes variables independientes, para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre la variable dependiente dentro de una situación de control. En la figura 13, se describe el procedimiento para la ejecución del proyecto.

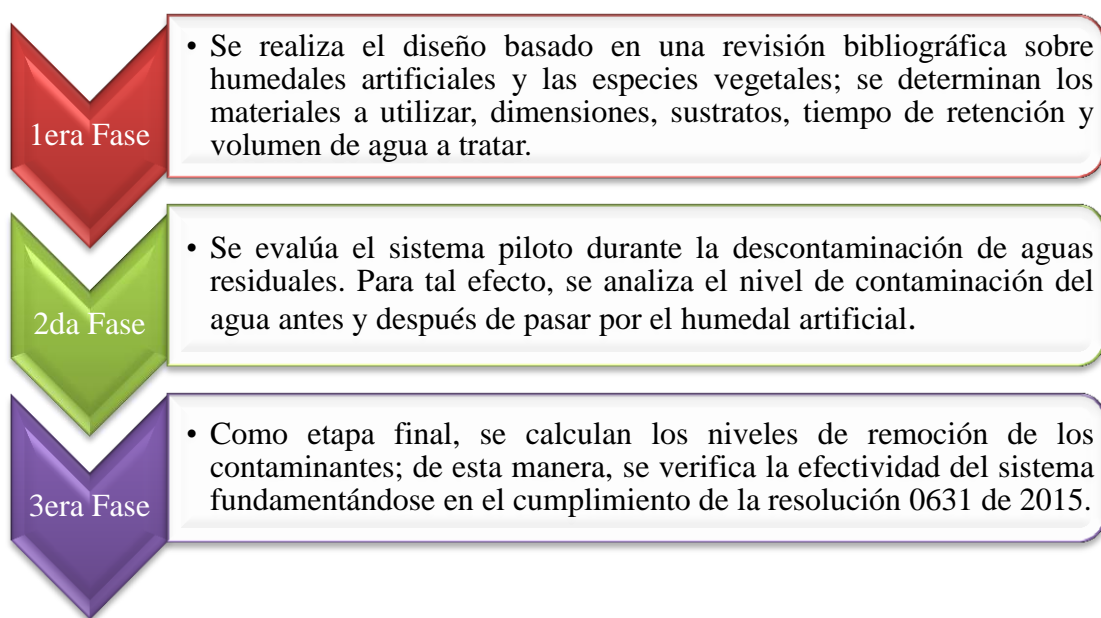


Figura 15. Fases a seguir para la ejecución del proyecto. Fuente: Autores, 2016.

Como primera fase, se realiza el diseño del sistema piloto basado en una revisión del estado del arte sobre tratamientos de aguas residuales en humedales artificiales y las especies vegetales que se emplean; de esta manera, se determinan los materiales a utilizar, el tipo de humedal a implementar y sus dimensiones, el tipo de sustratos y su cantidad, el tiempo de retención y el volumen de agua a tratar. Una vez establecido el diseño se realiza

el plano en un software libre (AutoCAD) que permita la salida gráfica y finalmente materializar su construcción.

La segunda fase consiste en evaluar el sistema piloto ya construido durante su operación en la descontaminación de aguas residuales. Para tal efecto, se debe conocer el estado del agua antes y después de pasar por el humedal artificial mediante el análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos establecidos por la resolución 0631 de 2015.

Para esta investigación se define como variable dependiente el porcentaje de remoción del sistema piloto empleando las especies vegetales *Costus spicatus* y *Heliconia psittacorum*; también se definen las variables independientes como el tipo y cantidad de sustrato, la forma y volumen del recipiente, la fuente del agua residual, el tiempo de retención dentro del sistema piloto y el volumen de agua manejado en el tratamiento, estas dos últimas son las variables modificadas intencionalmente en la investigación.

De esta manera se plantea dos valores para cada variable independiente. Para el tiempo se definen dos lapsos temporales (T_1 y T_2) y para el volumen se establecen dos cantidades (V_1 y V_2). La combinación de estas variables permite cuatro posibles mediciones como muestra la tabla 4.

Tabla 4

Mediciones según las posibles combinaciones de las variables

MEDICIÓN	TIEMPO	VOLUMEN
Medición 1	T_1	V_1
Medición 2	T_2	V_1
Medición 3	T_1	V_2
Medición 4	T_2	V_2

Nota. Estas mediciones se tienen en cuenta para la evaluación del agua residual antes y después del sistema piloto. Fuente: Autores, 2016.

Estas mediciones deberían arrojar diferentes resultados en el porcentaje de remoción por el humedal artificial; basados en dichos resultados se puede conocer con qué características se presenta una mejor remoción de los contaminantes en el agua residual, y así mismo afirmar con qué tiempo y volumen trabaja mejor el sistema piloto.

Se realiza una quinta medición en donde se repite una de las cuatro anteriores, con las mismas variables y condiciones de estudio, con el fin de corroborar la repetibilidad de los resultados.

Como etapa final, se calcula los niveles de remoción de contaminantes en el sistema piloto teniendo en cuenta los datos obtenidos en los análisis de laboratorio. De esta manera, se verifica la efectividad del sistema fundamentándose en el cumplimiento de la resolución 0631 de 2015 la cual establece los parámetros y valores límites máximos permisibles para vertimientos puntuales de acuerdo a la actividad realizada y la normatividad vigente asociada.

3.2 Población

En esta investigación se definen las aguas residuales como unidad de análisis. Se delimita la población como todas las aguas residuales que están siendo vertidas sin tratamiento en la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

Debido a que en la investigación la unidad de análisis son las aguas residuales servidas dentro de la institución, se pretenden caracterizarlas, aunque es de gran complejidad la cuantificación total de ellas, pues los vertimientos generados diariamente no poseen ningún tipo de medidor ni estudio acerca de ello. La UFPSO cuenta con tres estamentos (estudiantes, administrativos y docentes), en total 6721 personas como generadores de vertimiento resultantes de sus actividades diarias en la institución.

3.3 Muestra

Es importante determinar la proveniencia del agua residual que se usa para el sistema piloto, ya que los contaminantes presentes en ella están directamente relacionados con la actividad que los genera. La muestra de la población es el vertimiento puntual ubicado detrás del restaurante institucional.

Según el plano de la red sanitaria de la universidad, podemos identificar que los laboratorios de química, biología, ictiología, el restaurante, las cafeterías, los sanitarios, la zona de los centros de estudios y postgrados, los lavamanos y bebederos son las áreas que generan las aguas residuales que son conducidas al vertimiento puntual ubicado detrás del restaurante.

La figura 16 muestra el plano de la UFPSO, donde las líneas rojas representan las tuberías que conforman la red sanitaria de la institución. Cada línea roja conduce a un pozo séptico representado con un cuadro rojo y enumerado. Se etiqueta el sitio en donde está ubicado el pozo séptico general en el cual se extrae el agua residual para esta investigación. Los demás polígonos delineados en color negro representan la infraestructura de la universidad como los salones de clases, laboratorios, cafeterías, zona administrativa, anexos, y en general todas las construcciones.

Para este proyecto se realiza el tipo de muestreo simple, dicha muestra puede ser representativa de espacios y tiempos mayores si se sabe con anterioridad que la composición es constante y no existe alteración de la concentración contaminante en el tiempo, también permite determinar las características de descargas instantáneas y en este caso evaluar los efectos potenciales en el proceso de tratamiento.

El volumen de agua residual necesario para el estudio del sistema piloto se toma en el vertimiento puntual ubicado detrás del restaurante UFPSO, ya que en este punto es donde se vierte la mayoría de los residuos líquidos generados en las actividades de la institución; dicho volumen se toma durante un día hábil, procurando que la universidad esté en su normal funcionamiento y en la ejecución de todas sus labores, además de que esté presente la gran cantidad de estudiantes, administrativos y docentes como es habitual.

Luego de coleccionar el agua para el tratamiento, se toma una muestra por triplicado del afluente para ser llevada al laboratorio de aguas de la UFPSO y analizar los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos con que entra el agua. Posteriormente, se toma una muestra simple por triplicado a la misma agua residual después de haber pasado por el tratamiento en el sistema piloto (efluente) para realizar los mismos análisis, luego compararlos y finalmente conocer la remoción en cada parámetro.

Las muestras son tomadas por los autores del proyecto y se caracterizan de acuerdo al procedimiento estipulado por el RAS 2000 en su sección II título E capítulo E2 (Ministerio de desarrollo económico, dirección de agua potable y saneamiento básico, 2000), donde se establece la recolección y preservación de la muestra, metodología de aforo, rótulos, transporte al laboratorio, análisis, recipientes para la muestra, cantidad, preservación y los parámetros mínimos de la calidad del agua que deben medirse.

También se tiene como referencia el instructivo para la toma de muestras de aguas residuales establecidas por el IDEAM (2007), donde se determinan los requerimientos en cuanto a personal, equipos y materiales para el muestreo, así como el procedimiento adecuado que se debe seguir.

Geta, Merino y Martínez (1997) afirman que un porcentaje muy elevado de errores, se debe a la incorrecta identificación de las muestras. Por ello se incluye el correcto etiquetado de las muestras y el cuaderno de campo.

3.3.1 Etiquetado de las muestras. Todas las muestras deben ser etiquetadas para evitar confusiones o errores de identificación. Se emplea la etiqueta diseñada por los autores que se observa en la Figura 17, en donde se especifican los siguientes datos:

- Matriz de la muestra
- Tipo de muestra
- N° de la muestra
- Fecha y hora
- Persona que toma la muestra
- Sitio de muestreo
- Tipo de análisis a realizar
- Observaciones

Las etiquetas se llenan con marcador de tinta indeleble y se adhieren a la botella en el momento de la toma, luego el rótulo se cubre con una cinta adhesiva transparente para evitar su deterioro.


		MUESTRA DE AGUA PARA ANÁLISIS	
Matriz de la muestra:			
Tipo de muestra:		N° de la muestra:	
Fecha:		Hora:	
Tomada por:			
Sitio de muestreo:			
Tipo de análisis:			
Observaciones:			

Figura 17. Modelo de etiqueta para muestras de agua. Fuente: Autores, 2016.

3.3.2 Cuaderno de campo. Toda toma de muestra llevará consigo la cumplimentación de una ficha en la que se relacionan los datos y circunstancias necesarios para su identificación inequívoca y que permita una mejor interpretación de los resultados obtenidos. Dicha ficha se llena en el momento de la toma de muestra y se registra en un cuaderno y contendrá los siguientes datos:

- Matriz de la muestra
- Tipo de muestra
- N° de la muestra
- Fecha y hora
- Tomada por
- Sitio de muestreo
- Tipo de análisis
- Observaciones
- Adiciones a la muestra (H_2SO_4 , HNO_3 , etc.)
- Volumen de muestra recogido
- Parámetros determinados en campo (T° , pH, conductividad, turbidez, etc.)

3.4 Recolección de Información

Díaz Franky (2014) afirma que la recolección de la información se fundamenta en la medición de las variables y se lleva a cabo al utilizar procedimientos estandarizados y aceptados por una comunidad científica. En esta investigación se determinan y miden los parámetros de las aguas residuales mediante la práctica de laboratorio que se realiza con base en lo establecido en el *Standard Methods*, bibliografía conocida y aceptada para este tipo de análisis (American Public Health Association, American Water Works Association & Water Environment Federation, 2012).

Para el muestreo se organizan las botellas rotuladas, los reactivos y materiales necesarios. Se miden los parámetros de campo (*in situ*) con ayuda de una sonda

multiparamétrica introduciendo los electrodos para pH, temperatura, conductividad y turbidez; la sonda se usa de acuerdo a lo establecido en su manual operativo.

Para los demás parámetros (DQO, DBO₅, SST, SSED, grasas y aceites, fosfatos, fósforo, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal, fluoruros, sulfatos, aluminio, cobre, hierro, alcalinidad, dureza total y color real) se toma el volumen necesario (3 litros) y se lleva de forma inmediata al laboratorio de aguas de la UFPSO para su análisis.

Existen algunos parámetros que no pueden analizarse en el laboratorio de la UFPSO debido a la ausencia de un equipo específico o reactivo para su análisis. Por tanto, se seleccionan 500 mL de la muestra anteriormente tomada para enviar al laboratorio químico de consultas industriales (LQCI) de la Universidad Industrial de Santander, donde se realiza el análisis de nitrógeno total Kjeldahl. Las botellas con las muestras se colocan en posición vertical dentro de una cava de icopor agregando suficiente hielo y baterías térmicas para su adecuada refrigeración, de ser necesario se adiciona un conservante químico; la muestra se envía el mismo día de muestreo a las 8:00 am para que llegue al laboratorio UIS a las 3:00 pm (7 horas) del mismo día para su análisis inmediato.

Por su relevancia en el recurso hídrico y según lo establecido en el artículo 15 de la resolución 0631 de 2015, los parámetros fisicoquímicos en la calidad del agua que se analizan en esta investigación son los relacionados en la tabla 5.

Tabla 5*Parámetros fisicoquímicos que se analizan a las muestras de agua residual*

RESOLUCIÓN 0631 DEL 17 DE MARZO DE 2015	“Actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los capítulos V y VI con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial.” Artículo 15	
PARAMETRO	UNIDADES	VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES
Generales		
pH	Unidades de pH	6,0 a 9,0
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	150
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	50
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	mg/L	50
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	1
Grasas y Aceites	mg/L	10
Compuestos de Fósforo		
Fosfatos	mg/L	Análisis y Reporte
Fósforo Total	mg/L	Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno		
Nitratos	mg/L	Análisis y Reporte
Nitritos	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total	mg/L	Análisis y Reporte
Iones		
Fluoruros	mg/L	5
Sulfatos	mg/L	250
Metales y Metaloides		

Tabla 5: Continuación

Aluminio (Al)	mg/L	Análisis y Reporte
Cobre (Cu)	mg/L	1
Hierro (Fe)	mg/L	1
Otros parámetros para Análisis y Reporte		
Color Real	UPtCo	Análisis y Reporte
Conductividad	μS/cm	Análisis y Reporte
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte
Dureza total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte

Nota. Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales no Domésticas –ARnD para las actividades de servicios con vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales. Fuente: Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible MADS (2015).

Nota Específica. Para todas las actividades que realicen vertimientos, tendrán en el Parámetro de temperatura como valor límite máximo permisible el de 40 °C. Fuente: Artículo 5, resolución 0631 de 2015.

Según el artículo 6 de la resolución 0631 de 2015, se analizan los coliformes termotolerantes del agua residual si la carga másica antes del tratamiento es mayor a 125 kg/día de DBO₅. Sin embargo, se realizan los análisis microbiológicos relacionados en la tabla 6, aunque los niveles de la carga másica no superen lo estipulado.

La World Health Organization y la Panamerican Health Organization (1987) definen los coliformes termotolerantes como las bacterias del grupo de los coliformes totales que son capaces de fermentar lactosa a 44-45 °C.

Tabla 6

Parámetros microbiológicos que se analizan a las muestras de agua residual

RESOLUCION 0631 DEL 17 DE MARZO DE 2015		“Cuando la carga másica antes del tratamiento es mayor a 125 kg/ día de DBO ₅ .” Artículo 6
PARÁMETRO	UNIDADES	VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES
Coliformes Termotolerantes		
Coliformes Totales	NMP/100mL	Análisis y Reporte
E. Coli	NMP/100mL	Análisis y Reporte

Nota. Parámetros microbiológicos de análisis y reporte en los vertimientos puntuales de aguas residuales (ARD y ARnD) a cuerpos de aguas superficiales. Fuente: MADS (2015).

3.5 Análisis de Información

Debido a que los datos son producto de la medición de la concentración de un contaminante en el agua, se representan mediante números o cantidades y se deben analizar a través de métodos estadísticos para la comprobación de la hipótesis (Hernández Sampieri et al., 2010).

Se tiene en cuenta los datos obtenidos en los análisis de laboratorio para poder conocer el comportamiento del sistema piloto; estos datos son tabulados, y con ayuda del software estadístico Origin 8 se grafica para finalmente analizarlos y obtener conclusiones que permitan probar la hipótesis planteada.

Por otra parte, se hace una comparación entre los resultados obtenidos en cuanto a remoción de contaminantes por parte del sistema de tratamiento y el valor límite máximo permisible para los vertimientos estipulado por la normatividad ambiental y se verifica su cumplimiento.

Capítulo 4: Resultados

4.1 Revisión bibliográfica como guía para el diseño y construcción del sistema piloto

En esta primera fase se realiza el diseño y construcción del sistema piloto, basados en una revisión bibliográfica sobre los tipos de humedales artificiales, así como los tiempos de retención, volúmenes de agua tratado, dimensiones y materiales, densidad de siembra, medios filtrantes y en general todas las características empleadas en trabajos anteriores junto con los resultados obtenidos.

El desempeño de los humedales está relacionado con su tamaño, diseño, medio de soporte y tipo de agua residual a tratar (Kadlec & Wallace, 2009). Los humedales tienen dos tipos de diseño: superficial y subsuperficial (Brix, 2004), este último a su vez se divide de acuerdo al tipo de flujo en horizontal y vertical. La figura 18 muestra los tipos de humedales para la depuración de aguas residuales, así mismo en las tablas 8 y 9 se observan las características de cada humedal y sus diferencias.

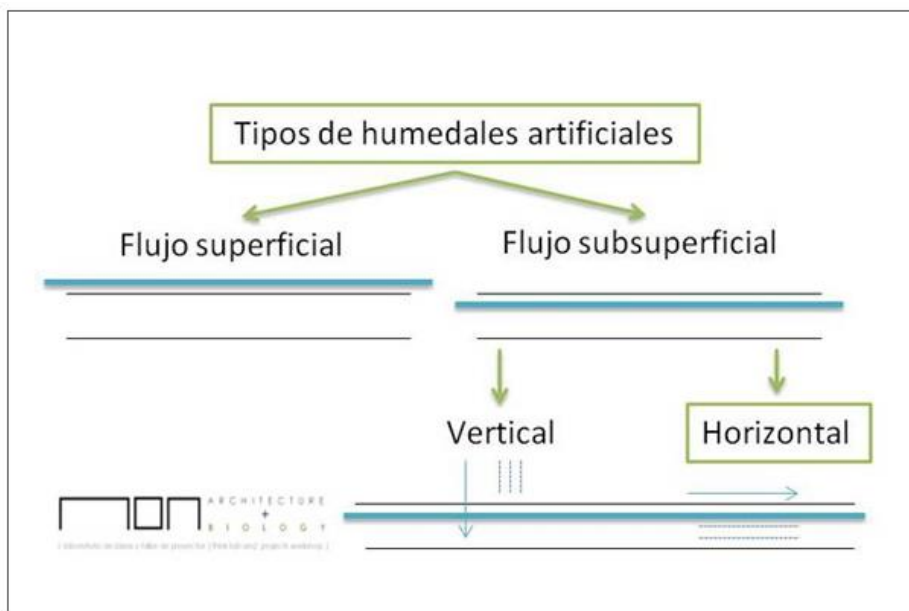


Figura 18. Clasificación de los humedales. Fuente: (Miguel, 2013).

Tabla 8*Características de los humedales construidos*

TIPO DE HUMEDAL	HUMEDALES DE FLUJO SUPERFICIAL	HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL	
SUBTIPO	N / A	Flujo horizontal	Flujo vertical
TAMAÑO	Por lo general más grade, debido a la limitada interacción del agua con un medio de soporte. Los rangos oscilan entre 100-10.000 m ² .	Mucho más pequeños que los humedales de flujo superficial, los rangos típicos están entre 10-3.500 m ² .	Son los humedales más pequeños entre la gama de humedales construidos, las áreas no exceden los 100 m ² .
HIDROLOGÍA	El agua fluye sobre la superficie del medio de soporte lo que restringe la interacción con los microorganismos, el flujo es usualmente continuo	El agua fluye a través del medio de soporte en dirección horizontal, el flujo es continuo	El agua fluye a través del medio de soporte en dirección vertical, el flujo es periódico.
VEGETACIÓN	El humedal puede sostener vegetación emergente, subemergente y flotante	Solo soporta vegetación emergente	Solo soporta vegetación emergente
EFICIENCIA	Altas eficiencias en la remoción de DBO, DQO y contaminantes particulados. Menos eficiente en la remoción de contaminantes disueltos, nitrógeno y fósforo.	Altamente eficiente en la remoción de DBO y DQO inclusive a bajas temperaturas, son más eficientes que los humedales de flujo superficial.	Altamente eficientes en la remoción de nitrógeno y fósforo, pero bajas eficiencias de remoción en términos de DBO y contaminación particulada.

Nota. La tabla muestra las características de los humedales artificiales de tipo superficial y subsuperficial (flujo horizontal y flujo vertical) Fuente: Adaptado de (Blackwell, Hogan, & Maltby, 2002) y (Quintero J. V., 2014).

Tabla 9*Diferencias entre humedal superficial y humedal subsuperficial*

DIFERENCIA ENTRE TIPOS DE HUMEDAL	SUPERFICIAL	SUBSUPERFICIAL
TRATAMIENTO	Tratamiento de flujos secundarios (aguas ya tratadas por otros medios, ej. Lagunas, biodiscos, fangos activados, etcétera)	Para flujos primarios (aguas pre tratadas ej. Tanques IMNOFF, pozos sépticos)
OPERACIÓN	Opera con baja carga orgánica	Altas tasas de carga orgánica
OLOR	Puede ser controlado aplicando medidas	No existen malos olores
INSECTOS	El control es caro	No se presentan insectos
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 constante
ÁREA	Requieren superficies de mayor tamaño	Requieren superficies de menor tamaño
COSTO	Menor costo en relación al subsuperficial	Mayor costo debido al material granular que puede incrementar el precio
VALOR ECOSISTEMA	Mayor valor como ecosistema para la vida salvaje, el agua es accesible a la fauna	Menor valor como ecosistema para la vida, el agua es difícilmente accesible a la fauna
USOS GENERALES	Son de restauración y creación de nuevos ecosistemas	Tratamiento de aguas residuales
OPERACIÓN	Son tratamientos adicionales a los sistemas convencionales (usadas para tratamiento terciario y mejoramiento de calidad de agua)	Puede usarse como tratamiento secundario

Nota. En la tabla se presentan las diferencias más relevantes de los humedales construidos.

Fuente: (Delgadillo et al., 2010).

Los humedales subsuperficiales de flujo horizontal también son buenos en la eliminación de sólidos suspendidos, bacterias y en la reducción de DBO₅ y son aceptables para desnitrificar (Arias y Brix, 2003; Vymazal J., 2009). En la figura 19 se pueden observar algunos de los mecanismos usados por los humedales para la depuración del agua residual.

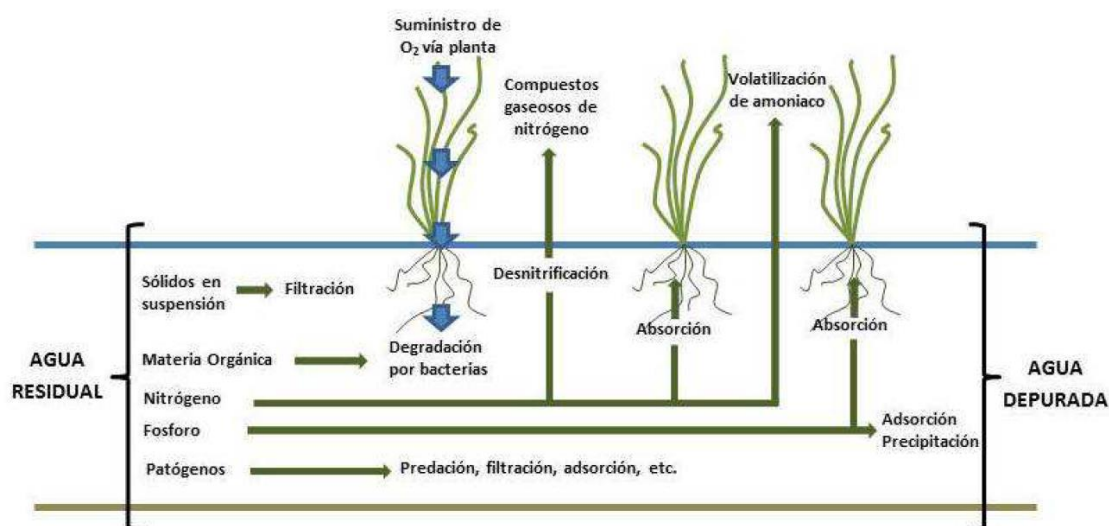


Figura 19. Procesos de depuración de los humedales artificiales. Fuente: (Lara Borrero, 1999).

Para los humedales artificiales de flujo subsuperficial la profundidad del lecho varía entre 0,45m a 1m y debe tener una pendiente entre 0,5% a 1%. Es fundamental que el agua residual que ingresa al sistema se mantenga en un nivel inferior a la superficie (5-10 cm) (Delgadillo et al., 2010).

En un humedal artificial a escala real, el tiempo de retención se establece en función al caudal del agua residual entrante, así como a la longitud del largo, ancho y profundidad del humedal, y a la porosidad del mismo (Peña Guzman & Lara Borrero, 2012).

Para nuestro caso, se diseñó un humedal a escala piloto donde el flujo es controlado mediante una llave de paso y un medidor de caudal, se establece un tiempo de retención promedio de acuerdo a la revisión de la literatura, dicho tiempo debe ser adecuado para que se dé el proceso de descontaminación en el sistema piloto.

En Ciudad de México se instaló un sistema piloto de humedal subsuperficial de flujo horizontal, allí se realizó un análisis de diferentes parámetros fisicoquímicos, se calculó el tiempo de retención hidráulico y determinó la eficiencia en la remoción de contaminantes. En ese caso se utilizó las especies *Phragmites australis* y *Typha dominguensis*, el sustrato empleado fue una mezcla de grava tezontle y arena. Los resultados de este sistema en cuanto al tiempo de retención hidráulica fue de 5 días, con una remoción de carga orgánica del 50%, la remoción de DQO fue del 95.73% en la temporada de estiaje; aunque respecto al fósforo no encontraron eficiencia en su remoción, se pudo determinar que los microorganismos ayudan a la remoción de la carga orgánica y de los nutrimentos del agua residual (Romero Aguilar, Colín Cruz, Sánchez Salinas, & Ortíz Hernández, 2009).

Según Lara (1999), los humedales son capaces de una reducción de coliformes fecales de entre uno y dos logaritmos con tiempos de retención hidráulica de 3 a 7 días y que son necesarios tiempos de retención superiores a 14 días para lograr reducciones de tres a cuatro logaritmos, lo que concuerda con Kolb (1998) quien reportó remociones de coliformes fecales y enterobacterias en varios humedales en la República Checa, siendo la eficiencia de remoción entre 98% a 99% y en los casos en que registraron las tasas más bajas, fue debido a tiempos de retención menores. El mayor beneficio en la utilización de la plantas es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz, si están disponibles, deben ser preferidas las plantas locales que estén adaptadas a las condiciones del sitio.

La utilización de los sustratos es importante porque estos van a soportar muchos de los organismos vivientes en el sistema piloto, allí se van a dar las transformaciones químicas y biológicas y funciona como un medio de contención para los contaminantes (Lara Borrero, 1999), esto sucede gracias a que en los lechos se mantienen condiciones aerobias mediante el flujo de aire a través de este, permitiendo a los microorganismos adherirse al sustrato formando una biopelícula que entra en contacto con la carga orgánica iniciando así el proceso de purificación.

Aunque los humedales artificiales son principalmente sistemas de tratamiento, la mayoría de autores coinciden en afirmar que proporcionan beneficios intangibles para el medio como aumentar la estética del sitio y reforzar el paisaje.

Así mismo, los autores concuerdan en que el agua residual es retenida por un tiempo largo al interior de los humedales o lagunas (1-8 días) y que estos sistemas son bastante resistentes a grandes incrementos de contaminantes en el agua residual, siempre y cuando duren poco tiempo (Peña, Ginneken, & Madera, 2003).

En la comunidad urbana de Lacabamba, región Ancash (Perú) se implementó un humedal de flujo subsuperficial de 58.5 m² y 0.45 m de profundidad a un tiempo de retención de 4.28 días y un volumen de agua a tratar de 12.84 m³, con pendiente de 1% e impermeabilizado con una geomembrana PVC de 0.5mm; este sistema de tratamiento de aguas servidas tiene un caudal de 105 m³/día para recuperar las aguas y adaptarlo al contexto local, reusándolo en un biohuerto comunal. El medio poroso se constituyó con grava y arena seleccionados: piedra chancada (1/2" de Ø) con una altura de 0.15 m; confitillo (3/8") con altura de 0.10 m; arena gruesa con altura de 0.12 m y confitillo (3/8") 0.05 m. Para implantar la cobertura vegetal en los humedales se procedió al trasplante de rizomas de carrizo o caña brava, las que se obtuvieron en los alrededores de la zona. Obtuvo resultados positivos encontrando remociones del 90% en sólidos suspendidos, 48% en DBO₅, 45% en fósforo y del 62% en coliformes fecales (SEMA/EMS, 2006).

Un conjunto de estudiantes de la universidad del Valle y la universidad de Antioquia, realizó un estudio sobre la influencia de la *Heliconia psittacorum* en la eliminación de nitrógeno en un humedal subsuperficial de flujo horizontal, como sustratos usaron una malla llenada con carbonilla (2-5 mm de diámetro, capa de 8 cm) y grava (25-40 mm de diámetro, capa de 40 cm), el tiempo teórico de retención hidráulico fue de 2.5 y 1.0 días; concluyeron que dicha especie promueve la eliminación de nitrógeno en los microcosmos, probablemente por la translocación de oxígeno a la rizósfera, la cual estimula la nitrificación/desnitrificación. Según el análisis realizado por los autores en los microcosmos plantados y sin plantar se eliminó el 19,7% y 16,2% de la carga de N afluyente, mientras que la acumulación en el medio de soporte eliminó el 6,2% y 5,0% del N afluyente, respectivamente (Gutierrez Mosquera, Peña Varón, & Aponte Reyes, 2010).

El mismo año se realizó otro estudio a lo largo de seis meses (Montoya, Ceballos, Casas, & Morató, 2010), donde se investigó la remoción de materia orgánica con agua residual sintética, en términos de DQO, DBO₅ y mediciones *in situ* de pH, oxígeno y temperatura. Para ello diseñaron seis sistemas de humedales de tipo subsuperficial con flujo horizontal, a escala piloto con fibra de vidrio, de 1,0 m de largo, 0,6 m de alto y 0,6 m de ancho; se les agregó grava de diámetro 3,2 - 6,4 mm, de 48 % de porosidad, hasta 0,3 m de alto, una lámina de agua de 0,25 m de alto y dejando el agua residual con un tiempo de retención de 7 días. En los humedales se sembró: *Canna limbata*, *Heliconia psittacorum* y *Phragmites sp* con una densidad de siembra de 6 plantas por m². Las remociones medias de DQO fueron de 97,31% y 95,94% para *C. limbata*; 94,49% y 93,50% para *H. psittacorum*; 97,39% y 97,13% para *Phragmites sp*. En DBO₅ fueron de 100% y 99,36% para *C. limbata*; 99,09% y 97,49% para *H. psittacorum*; 100% y 99,45% para *Phragmites sp*.

Otro experimento se desarrolló en la universidad del Valle, donde usaron reactores que asemejan humedales subsuperficiales de flujo horizontal, construidos con fibra de vidrio a escala de microcosmos con 0.60 m, 0.30 m y 0.50 m de largo, ancho y alto respectivamente, con una lámina de agua de 0.40 m. Las especies vegetales utilizadas fueron: *Colocasia esculenta*, *Heliconia psittacorum* y *Gynerium sagittatum*; las alimentaron con lixiviado sintético durante un tiempo de retención hidráulica de tres días. La siembra se hizo por esquejes con tres individuos por reactor (densidad de 17 plantas por m²) en un medio de soporte de grava de 25 mm de diámetro y porosidad de 38.6% (Madera Parra, Peña Salamanca, & Solarte-Soto, 2014).

En Pereira una evaluación para la remoción de hidrocarburos implementó tres humedales en concreto (humedal con plantas y sustrato, con plantas sin sustrato, sin plantas y con sustrato) con alturas de 0.80 m y área superficial de 1.95 m² funcionando en paralelo. La especie sembrada fue *Phragmites australis* con densidad de 20 plantas por m², y como medio de soporte grava con diámetro entre 1.3 y 3.8 cm y porosidad promedio del 50%.

Los mejores resultados fueron sustentados en el humedal con plantas y sustrato para una DQO y DBO₅ de 84% y 92% respectivamente, siendo su mayor eficiencia atribuida no solo a las plantas sino también a la presencia de matriz filtrante, debido a que su área

superficial permite el anclaje de microorganismos y aumenta la capacidad de absorber sustancias (Cubillos Vargas, 2011).

Para finalizar esta revisión bibliográfica, se revisó el caso de Árias Martínez et al. (2010), donde usaron un tiempo de retención hidráulica de 0.57 día (13.68 horas) en un sistema piloto de humedal construido en serie, empleando tres especies vegetales (*Brachiaria mutica*, *Brachiaria arrecta*, *Hedychium montana*). Los materiales a utilizar para medio filtrante fueron inertes para que estos no aporten nutrientes color o cambios en los parámetros fisicoquímicos en el agua residual a tratar, usaron grava 15%, arenón chino 10%, arena 50% y vermiculita 20%, aumentando el tamaño de la partícula a mayor profundidad. Además (Pérez & Camacho, 2011) indican, que las rocas usadas para medio filtrante deben tener un diámetro de 5 a 10 cm y una profundidad del filtro entre 90 cm y 240 cm para sistemas de tratamiento extensos; como resultados obtuvieron una remoción de DBO₅, nitrógeno y fósforo superior al 80%, 90% y 90% respectivamente al final del tratamiento. El diseño se basó en el modelo para la remoción de DBO en humedales de flujo subsuperficial empleado por Sherwood C. y Reed (Lara, 1999).

4.2 Diseño propuesto por los autores

En la realización del diseño se tuvo en cuenta principalmente la revisión bibliográfica, los antecedentes encontrados tanto en trabajos de humedales artificiales como en los estudios existentes acerca de las especies vegetales. De esta manera, se determina implementar el sistema piloto basado en humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal debido a sus ventajas (véase tabla 8 y 9), también se selecciona las especies *Costus spicatus* y *Heliconia psittacorum* debido a que estas especies se dan muy bien en la región facilitando su recolección, transporte, cultivo, adaptabilidad a la zona, además de sus propiedades fisiológicas como la profundidad de sus raíces, el grosor del tallo, su rápida propagación, las características de las hojas, el mecanismo en que asimilan los nutrientes y los trabajos que han sugerido evaluar su potencial fitorremediador.

El sistema diseñado como muestra la figura 20, consta de un tanque aéreo de 500 litros ($0,5\text{m}^3$) en el cual se almacena el agua residual, en este punto se toma la muestra para el análisis del agua residual sin tratar. Dicho tanque tiene en su parte inferior un orificio que lleva conectado una tubería de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro en la que se incluye una llave de paso y un medidor para controlar el flujo y el caudal del agua respectivamente; este tubo se divide en 3 direcciones en las cuales estarán ubicadas las unidades de tratamiento o unidades experimentales separadas a 1 metro de distancia entre ellas, contando cada una con llaves de paso para controlar la entrada y salida del agua residual, después de un tiempo de retención donde se da el proceso de descontaminación por fitorremediación.

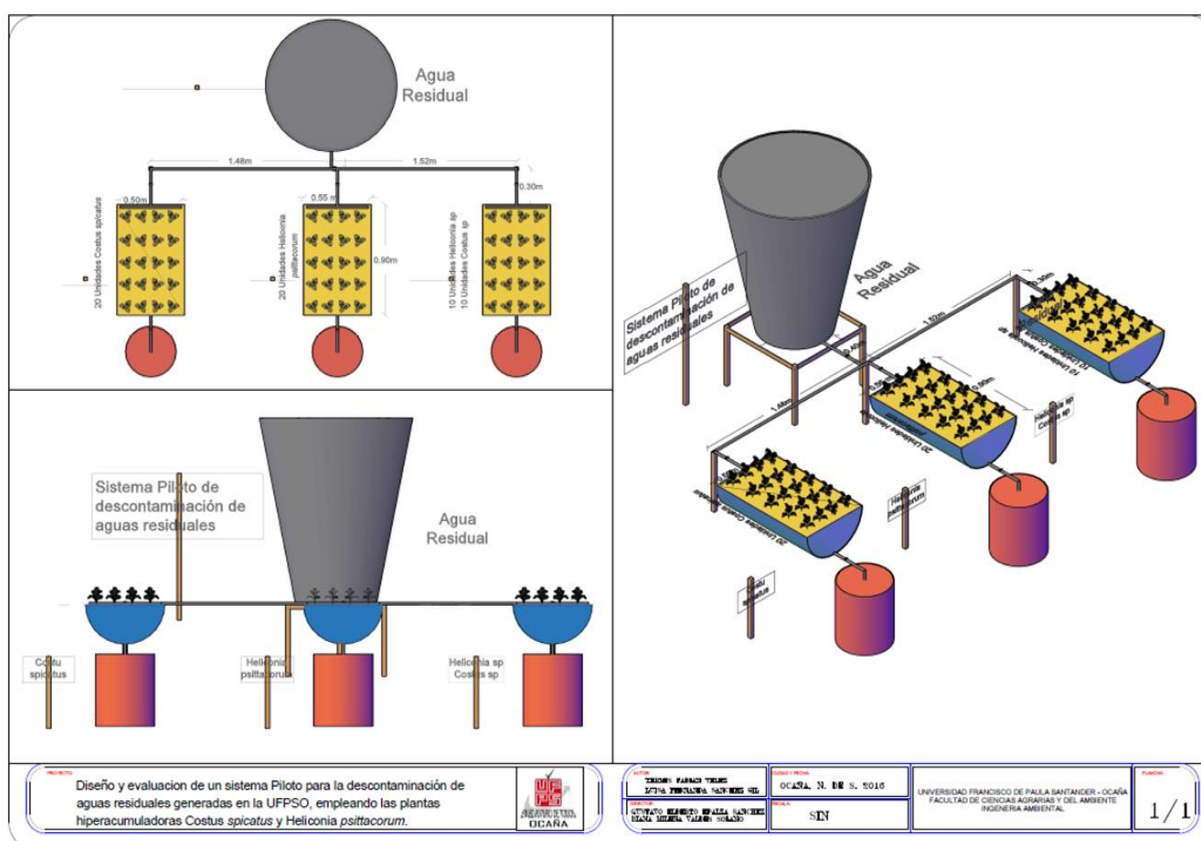


Figura 20. Diseño del sistema piloto. Fuente: Autores, 2016.

Cada unidad de tratamiento está elaborada con tambores de polietileno de alta densidad de 55 galones divididos diametralmente, formando así una especie de contenedor. Las 3 unidades tienen dimensiones similares, correspondiendo a 90 cm de largo x 55 cm de ancho x 27 cm de radio, de tal manera que el volumen máximo contenido es de 103 litros.

Dentro de las unidades se establecen capas de sustratos de diferente granulometría para que sirvan como medio filtrante, soporte de las especies vegetales y permitir la circulación de manera adecuada del agua; como se muestra en la figura 21, los sustratos seleccionados con su respectivo porcentaje contenido en el sistema son: grava gruesa (25%), granito #3 (25%) y arena (50%), estos materiales deben ser inertes y poseer condiciones que no aporten nutrientes, color o cambios en los parámetros fisicoquímicos de las aguas tratadas como afirma Árias Martínez et al., 2010.



Figura 21. Sustratos seleccionados y su porcentaje en el medio filtrante. Fuente: Autores, 2016.

En las unidades experimentales se siembran las especies vegetales y es donde se permite un tiempo de retención a un volumen de agua para que se dé el proceso de descontaminación mediante la fitorremediación. Después de cumplido el tiempo de retención, el efluente saldrá por la llave de paso instalada en la parte inferior de cada unidad experimental siendo conducido a un recipiente ubicado debajo de ésta, de tal manera que se reciba todo el flujo del agua tratada y allí mismo tomar la muestra para su análisis.

Basados en los estudios anteriores, se definen dos lapsos temporales, el primero (T_1) de dos (2) días y el segundo (T_2) de cinco (5) días.

Por otra parte, el volumen de agua se relaciona directamente con las dimensiones de la unidad de tratamiento, ya que de estas depende la capacidad de volumen a contener. Según la capacidad de las unidades y los estudios anteriormente realizados, se estableció

para el volumen dos cantidades de agua a tratar: el primer volumen (V_1) es de 25 litros y el segundo (V_2) de 12,5 litros. Una vez establecidos los tiempos y volúmenes se presenta en la tabla 10 las mediciones con las cuales se trabajó.

Tabla 10

Condiciones a evaluar en el sistema piloto

MEDICIÓN	TIEMPO	VOLUMEN
Medición 1	25L	48h
Medición 2	25L	120h
Medición 3	12,5L	48h
Medición 4	12,5L	120h

Nota. Mediciones basadas en las variables bajo las cuales se evaluó el sistema piloto. Fuente: Autores, 2016.

Al definir estas variables independientes podemos afirmar, después de obtener los resultados, con qué cantidad de agua y tiempo de retención existe una mayor remoción de los contaminantes, es decir, si la remoción por el sistema piloto es mejor a mayor o menor volumen y tiempo de retención.

Para la construcción del sistema piloto la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña destinó un espacio de 15 m² dentro del vivero de la institución. El sitio se adecuó para dicha construcción, se incluye un tejado para la protección en caso de precipitaciones y de esta manera asegurar que el agua residual nunca tenga dilución con aguas lluvias. El sitio en donde se construye el sistema piloto se encuentra a 115 metros del pozo séptico general que recibe las aguas residuales de la UFPSO, de este vertimiento puntual se toma la muestra que es almacenada en el tanque de 500L. En la figura 22 se observa el sistema piloto construido en el vivero de la UFPSO.



Figura 22. Sistema piloto construido. Fuente: Autores, 2016.

Para la siembra en el sistema piloto se seleccionaron los individuos más sanos de cada especie para trasplantarlos. Las plantas fueron recolectadas con un año de anterioridad y estuvieron bajo cuidado en el vivero de la UFPSO, en este tiempo la propagación de las especies fue abundante, contando con la cantidad necesaria para la ejecución del proyecto. La siembra se realizó manualmente trasplantando 15 individuos a cada unidad experimental (densidad de 30 plantas por m²). En la figura 23 se observan los individuos de las dos especies fuera de sus bolsas de siembra y listas para trasplantar.



Figura 23. *Heliconia psittacorum* y *Costus spicatus* listas para trasplantar al sistema piloto.

Fuente: Autores, 2016.

El sistema piloto cuenta con tres unidades experimentales (UE). En el primero de ellos (UE₁) se siembra 15 individuos de la especie *C. spicatus*, en el segundo (UE₂) 15 individuos de la especie *H. psittacorum* y en el tercero (UE₃) se siembran las dos especies en cantidades iguales. Al lado de cada unidad experimental se ubica un individuo de cada especie en su respectiva bolsa de cultivo, este sirvió como patrón de comparación con los sembrados dentro de las unidades experimentales, de esta manera se pueden observar si existen cambios y/o respuestas fisiológicas de las plantas que operan dentro del sistema.

Después de trasplantar las especies a las unidades experimentales, se dejan 30 días para su adaptación al sustrato y a las condiciones. Transcurrido el tiempo se pone en funcionamiento el sistema piloto permitiendo la entrada controlada del flujo de agua residual, tomando muestras tanto antes como después del tratamiento. En la figura 24 se observan recipientes con muestras que se analizaron en laboratorio.



Figura 24. Muestras de agua residual. De izquierda a derecha en ambas imágenes, muestras del afluente, UE₁, UE₂ y UE₃. Fuente: Autores, 2016.

4.3 Evaluación del sistema piloto

Una vez diseñado y construido el sistema piloto se inicia con la segunda fase del proyecto que consiste en la evaluación del mismo, mediante el análisis del agua residual antes y después del tratamiento. Para esta evaluación se analizó las muestras en laboratorio por triplicado (repetibilidad) para tener una mayor confiabilidad. Los datos que se usan en

el análisis estadístico son los resultados promedios y su desviación estándar, que han sido tabulados y determinados en los formatos reportados en el apéndice A.

Como fase final, se calculan los niveles de remoción de los contaminantes teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los análisis de la segunda fase, de esta manera se verifica la efectividad del sistema teniendo en cuenta los porcentajes de remoción, la carga removida y el cumplimiento de la resolución 0631 de 2015.

Se encontró que la temperatura del agua residual tanto antes como después del tratamiento no supera los 40 °C, cumplimiento con lo establecido en el artículo 5 de la resolución 0631 de 2015.

La turbiedad es originada por las partículas en suspensión o coloides, es decir, aquellas que por su tamaño se encuentran suspendidas y reducen la transparencia del agua en menor o mayor grado (Barrenechea Martel, 2012). En el caso de los afluentes se observa un alto grado de turbidez que es disminuido al 100% después de pasar por las unidades experimentales, obteniendo efluentes sin turbidez. Esta disminución además de mejorar la calidad estética del agua, presenta una reducción de los costos a comparación de otros sistemas en los cuales se requieren usar coagulantes, acondicionadores de pH, ayudantes de coagulación, entre otros.

El pH es un parámetro básico que indica el grado de acidez o basicidad del agua. Se obtuvo un resultado de pH con leves disminuciones en los efluentes, pero manteniéndolo en niveles óptimos para los procesos de remoción en los demás contaminantes. Esto se debe a que las plantas por actividad fotosintética generan un equilibrio buffer y no permiten que el pH cambie bruscamente y la actividad de los microorganismos se vea afectada (Montoya et al., 2010).

Para los demás parámetros analizados se presentan los resultados obtenidos mediante tablas con los datos del afluente, efluente, el porcentaje de remoción y la carga removida. Seguidamente se ilustran los resultados mediante el uso de gráficas con su desviación estándar para mostrar las relaciones entre las condiciones de volumen y tiempo trabajadas, así como la comparación entre las especies vegetales empleadas.

Los vertimientos generados en la UFPSO tienen altos contenidos de materia orgánica, la cual se puede medir en términos de DQO y DBO₅. En las tablas 11 y 12 se presentan los resultados de la remoción para estos dos parámetros.

Tabla 11

Resultados para demanda química de oxígeno (DQO)

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO							
Standard Methods 8000 Unidad: mg/L O ₂				Espectrofotómetro UV-Visible DR 6000 Procedimiento: 430			
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor en afluente (mg/L O ₂)	Valor en efluente (mg/L O ₂)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida (mg/L O ₂)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	398,9	141,6	64,50	257,3
		25	120	385,3	83,0	78,45	302,3
		12,5	48	347,3	73,6	78,80	273,7
		12,5	120	347,3	30,3	91,27	317,0
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	398,9	127,3	68,08	271,6
		25	120	385,3	81,3	78,89	304,0
		12,5	48	347,3	23,3	93,29	324,0
		12,5	120	347,3	14,0	95,96	333,3
3	<i>Costus spicatus</i> y <i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	398,9	139,5	65,02	259,4
		25	120	385,3	104,6	72,85	280,7
		12,5	48	347,3	38,3	88,97	309,0
		12,5	120	347,3	36,6	89,46	310,7

Nota. La tabla muestra la relación de DQO antes y después del tratamiento, determinando el porcentaje de remoción y la cantidad removida por cada unidad experimental. Fuente: Autores, 2016.

La DQO equivale a la cantidad de oxígeno consumido por los cuerpos reductores presentes en un agua sin la intervención de los organismos vivos. De la figura 25 se puede inferir que a pesar de las altas concentraciones en la carga contaminante de los afluentes, se presentan remociones considerables en todas las condiciones evaluadas (volumen-tiempo). Los mejores resultados se presentan en las mediciones trabajadas con 12,5 L, lo que

demuestra mayor eficiencia en menor volumen de agua, además se observa que al aumentar el tiempo de retención se mejora el porcentaje de remoción.

En dichas condiciones se observa que la especie vegetal con mejores resultados es la *Heliconia psittacorum* removiendo en el mejor de los casos el 95,9% de DQO; bajo estas mismas condiciones también se destaca la *Costus spicatus* con un 91,2% mostrándose como una alternativa potencial.

El artículo 15 de la resolución 0631, establece para la DQO un valor límite máximo permisible (VLMP) de 150 mg/L O₂; ya que todos los resultados después de los tratamientos (efluentes) son menores a la carga estipulada, se puede determinar que bajo todas las condiciones evaluadas se cumple con lo establecido en la normatividad.

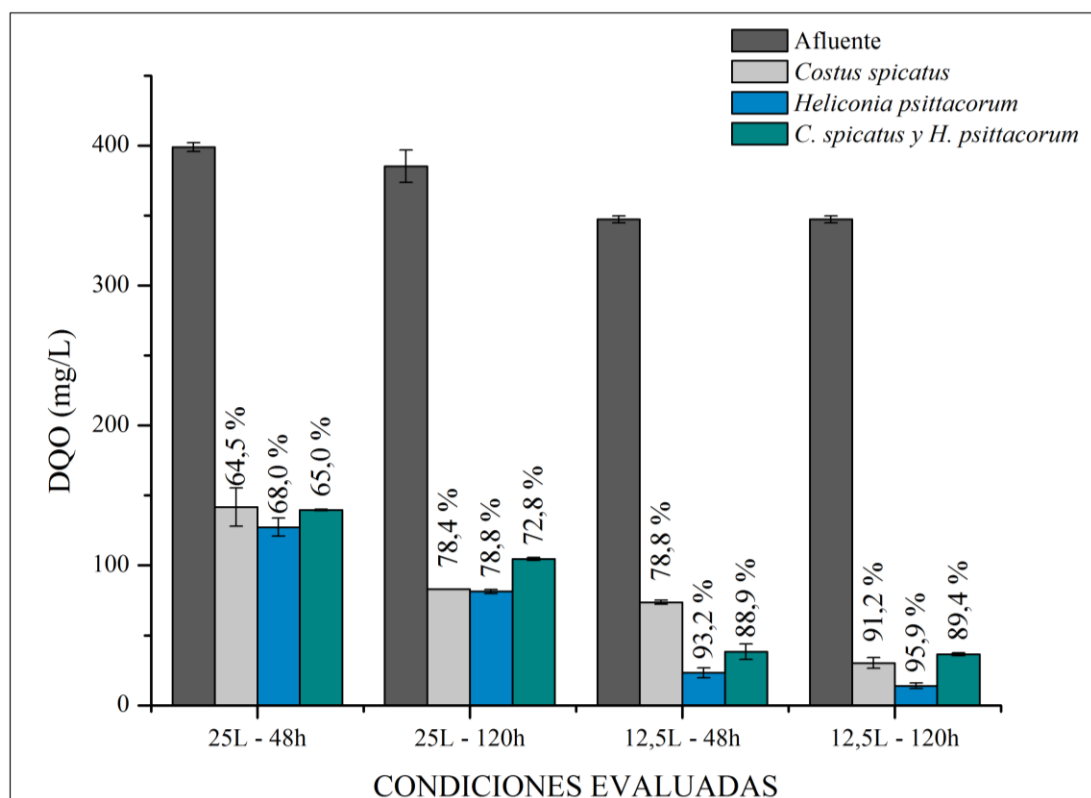


Figura 25. Resultados obtenidos para DQO bajo las condiciones evaluadas. En la gráfica se observan los porcentajes de remoción con cada una de las especies vegetales empleadas. Fuente: Autores, 2016.

Tabla 12*Resultados para demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)*

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO							
Standard Methods 5210 B / Dilución							
Unidad: mg/L O ₂							
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluente (mg/L O ₂)	Valor efluente (mg/L O ₂)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida (mg/L O ₂)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	536,6	401,3	25,21	135,3
		25	120	443,3	89,2	79,87	354,1
		12,5	48	475,7	236,9	50,19	238,8
		12,5	120	475,7	42,3	91,10	433,4
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	536,6	309,3	42,36	227,3
		25	120	443,3	50,4	88,64	392,9
		12,5	48	475,7	136,8	71,24	338,9
		12,5	120	475,7	19,6	95,89	456,1
3	<i>Costus spicatus</i> y <i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	536,6	342,4	36,20	194,2
		25	120	443,3	65,9	85,13	377,4
		12,5	48	475,7	198,6	58,25	277,1
		12,5	120	475,7	43,5	90,86	432,2

Nota. La tabla muestra la relación de DBO₅ antes y después del tratamiento, determinando el porcentaje de remoción y la cantidad removida por cada unidad experimental. Fuente: Autores, 2016.

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) corresponde a la cantidad de oxígeno consumido para la degradación de la materia orgánica, durante 5 días a 20°C. Las concentraciones más altas de materia orgánica fueron medidas en términos de DBO₅ como muestran los afluentes de la figura 26, a diferencia de la DQO. Este parámetro presentó los dos resultados más significativos en las mediciones con mayor tiempo de retención (120h), de los cuales la mayor remoción se obtuvo con 12,5L.

Para estas condiciones se observa que la *H. psittacorum* tuvo un 95,8% de remoción, siendo la mejor especie, seguida de la *C. spicatus* con un 91,1%, y por último la unidad

experimental plantada con las dos especies que removió el 90,8%. Esta eficiencia se atribuye tanto a las macrófitas como al medio filtrante, debido a que su área superficial permite el anclaje de microorganismos y aumenta la capacidad de absorber sustancias (Reed, Crites, & Middlebrooks, 2006; Stottmeister et al., 2003; Lara Borrero, 1999).

Las altas remociones se garantizan por el hecho de que las raíces de las plantas proporcionan sitios específicos como la rizósfera donde se desarrollan procesos microbiológicos, al igual que los procesos de adsorción y filtración (Armstrong, Armstrong & Beckett, 1990; Brix, 1994). Además, La materia orgánica al representar una fuente de alimentación para los organismos (autótrofos y heterótrofos) presentes en el agua, tiende a desaparecer progresivamente por oxidación, y pasar a CO₂, amoníaco, nitritos, nitratos, etcétera (Cánepa de Vargas, Maldonado Yactayo, Barrenechea Martel, & Aurazo de Zumaeta, 2004).

El valor límite máximo permisible (VLMP) para la DBO₅ es de 50 mg/L O₂; de esta manera se determina que las tres unidades experimentales bajo el volumen de 12,5L y tiempo de 120h cumplen con el valor establecido en la norma. A pesar de que la condición de 25L-120h no cumple con la normatividad (debido a los altos valores del afluente), se resalta que se obtuvo remociones para las tres unidades experimentales mayores al 80%, lo que significa que para vertimientos con cargas orgánicas menores a 250mg/L de DBO₅ también sería una opción potencial que cumpliría con la normatividad.

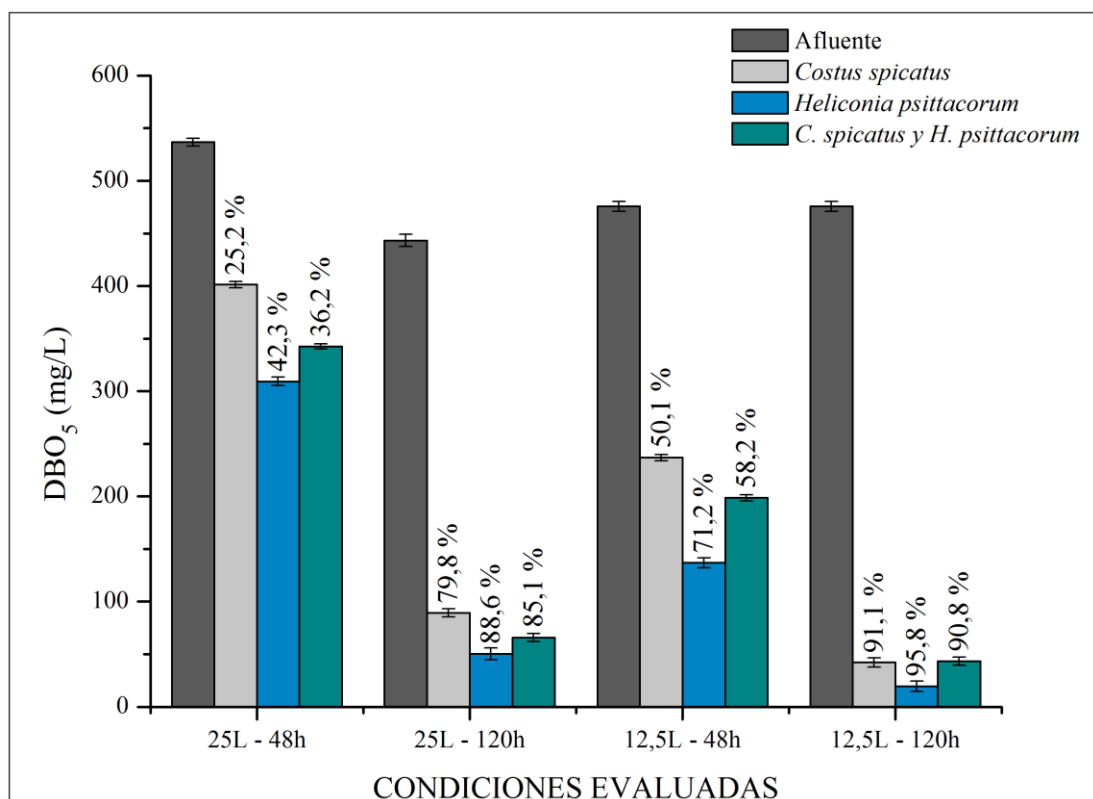


Figura 26. Resultados obtenidos para DBO₅ bajo las condiciones evaluadas. En la gráfica se observan los porcentajes de remoción con cada una de las especies vegetales empleadas. Fuente: Autores, 2016.

Los sólidos en el agua residual pueden ser de tipo orgánico y/o inorgánico y provienen de las diferentes actividades industriales, se pueden clasificar como: totales, suspendidos, disueltos y sedimentables. El contenido de sólidos en el agua afecta directamente la cantidad de lodos que se produce en el sistema de tratamiento o disposición. En esta investigación se evalúa la remoción de los sólidos suspendidos totales y sólidos sedimentables debido a su importancia y a la exigencia de un valor permisible para ellos en la normatividad. En la tabla 13 se observan los resultados para los SST y en la tabla 14 para los SSED.

Tabla 13*Resultados para sólidos suspendidos totales (SST)*

SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES							
Standard Methods 2540 D / Gravimétrico							
Unidad: mg/L SST							
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluente (mg/L)	Valor efluente (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida (mg/L)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	347,6	75,6	78,25	272
		25	120	336,4	44,8	86,68	291,6
		12,5	48	314,8	29,2	90,72	285,6
		12,5	120	314,8	12,2	96,12	302,6
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	347,6	46,4	86,65	301,2
		25	120	336,4	36,8	89,06	299,6
		12,5	48	314,8	20,4	93,51	294,4
		12,5	120	314,8	3,4	98,91	311,4
3	<i>Costus spicatus</i> y <i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	347,6	56	83,88	291,6
		25	120	336,4	41,2	87,75	295,2
		12,5	48	314,8	24	92,37	290,8
		12,5	120	314,8	7,2	97,71	307,6

Nota. La tabla muestra la relación de SST antes y después del tratamiento, determinando el porcentaje de remoción y la cantidad removida por cada unidad experimental. Fuente: Autores, 2016.

Los SST son los que tienen partículas superiores a un micrómetro y que son retenidos mediante una filtración en el análisis de laboratorio (Barrenechea Martel, 2012). En todas las condiciones evaluadas que se muestran en la figura 27 se aprecian altos porcentajes de remoción, la cual se optimiza al prolongarse el tiempo de retención y disminuir el volumen de agua a tratar, de tal manera que las remociones más eficientes se presentaron con los 12,5L y 120h. La especie con mejores resultados fue la *H. psittacorum* con remociones del 98,9% y 93,5%; en tanto la combinación de las especies removió el 97,7% y 92,3% superando la *C. spicatus* con el 96,1% y 90,7%.

La sedimentación de los sólidos suspendidos se promueve por la baja velocidad de flujo que con frecuencia es laminar en los humedales (Londoño Cardona & Marin Vanegas, 2009). Aunque la presencia del medio filtrante en la disminución de los sólidos suspendidos es de gran influencia, se destaca la acción de las especies vegetales para mejorar dicha remoción, ya que estos sólidos después de adheridos y/o acumulados en el sustrato se degradan y son asimilados por las plantas.

El VLMP para los SST es de 50 mg/L, la tabla 13 en la columna de los efluentes muestra que solo la medición de 25L-48h no cumple, ya que para las demás mediciones en todas las unidades experimentales dieron resultados menores a la carga estipulada. Se confirma el gran potencial para la remoción de los sólidos tanto en efectividad por la carga removida como por el cumplimiento de la normatividad.

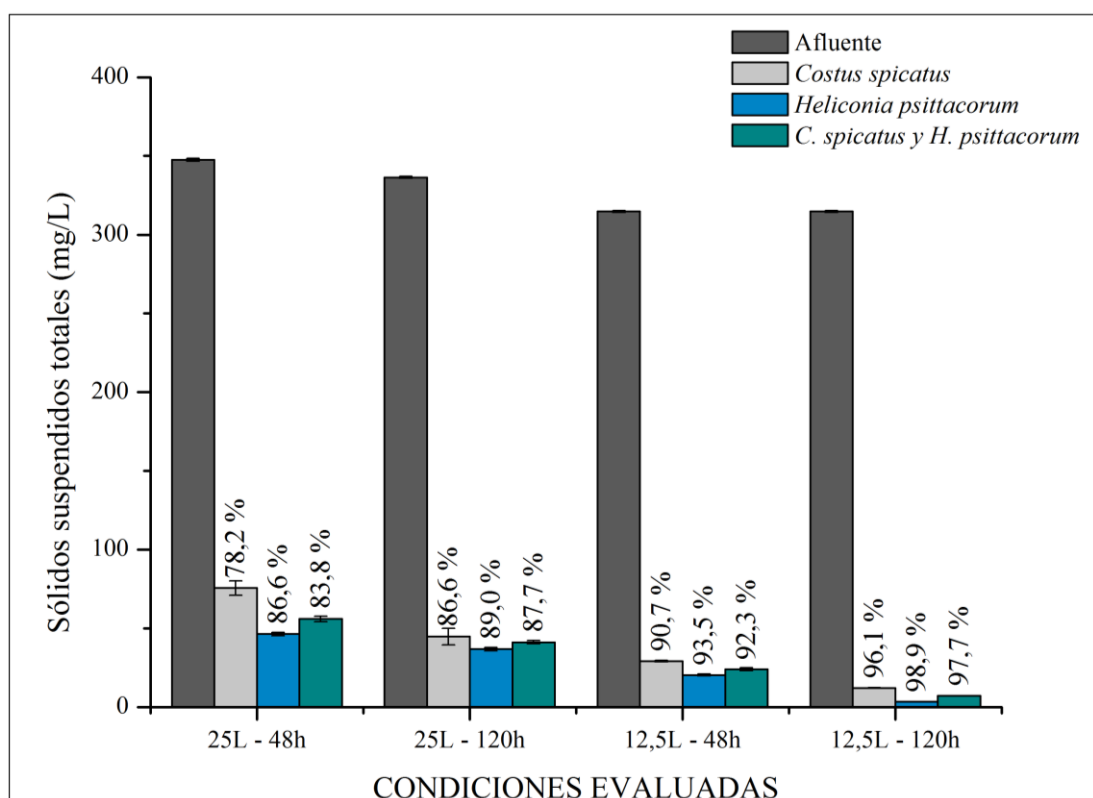


Figura 27. Resultados obtenidos para SST bajo las condiciones evaluadas. En la gráfica se observan los porcentajes de remoción con cada una de las especies vegetales empleadas. Fuente: Autores, 2016.

Tabla 14*Resultados para sólidos sedimentables (SSED)*

SÓLIDOS SEDIMENTABLES							
Standard Methods 2540 F / Gravimétrico							
Unidad: mL/L SSED							
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluyente (mL/L)	Valor efluente (mL/L)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida (mL/L)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	1,9	0,1	94,73	1,8
		25	120	1,9	0,0	100	1,9
		12,5	48	1,9	0,02	98,94	1,88
		12,5	120	1,9	0,0	100	1,9
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	1,9	0,05	97,36	1,85
		25	120	1,9	0,0	100	1,9
		12,5	48	1,9	0,01	99,47	1,89
		12,5	120	1,9	0,0	100	1,9
3	<i>Costus spicatus</i> y <i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	1,9	0,05	97,36	1,85
		25	120	1,9	0,0	100	1,9
		12,5	48	1,9	0,02	98,94	1,88
		12,5	120	1,9	0,0	100	1,9

Nota. La tabla muestra la relación de SSED antes y después del tratamiento, determinando el porcentaje de remoción y la cantidad removida por cada unidad experimental. Fuente: Autores, 2016.

Los SSED son una medida del volumen de sólidos asentados al fondo de un cono imhoff, en un período de una hora, y representan la cantidad de lodo removible por sedimentación simple; se expresan comúnmente en mg/L. En la figura 28 se puede observar que en todas las condiciones evaluadas se presentan altas disminuciones en los SSED. Sin embargo, se observa que para el tiempo de retención de 120h, tanto a 25L como a 12,5L, la remoción fue del 100% en todas las unidades experimentales. Por tanto, se infiere que al igual que en los SST los mejores resultados se obtuvieron a mayor tiempo de retención, esto debido a la mejor precipitación de los sedimentos y su posterior

degradación y/o asimilación por las plantas. Se destaca que la remoción más baja presentada para la *C. spicatus* fue del 94,7%; para la *H. psittacorum* de 97,3%, y para la unidad experimental combinada del 97,3%, siendo aún estos resultados muy positivos.

La OPS/OMS (1999) afirma que los microorganismos crean paredes biológicas que facilitan la sedimentación de las partículas (SSED) jugando un papel importante en la remoción de SST. Los principales procesos que intervienen en la eliminación de los sólidos son la sedimentación, filtración y degradación microbiana (Lahora Cano, 2002).

La resolución establece como VLMP para los SSED el de 1,0 mL/L. Después del tratamiento se muestra que se cumple con este requisito bajo todas las condiciones evaluadas (volumen-tiempo) y con todas las especies vegetales, resaltando que el afluente usado antes del tratamiento tendía a duplicar lo establecido, lo que muestra la efectividad del sistema para la disminución de este tipo de sólidos.

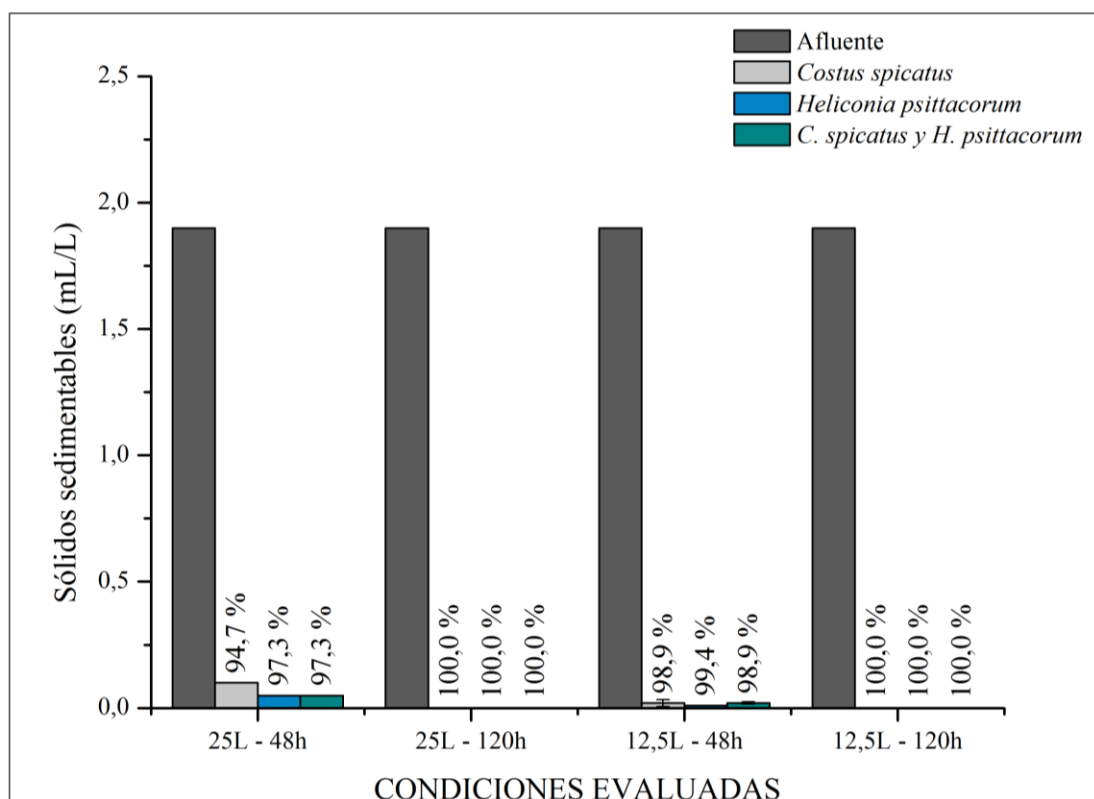


Figura 28. Resultados obtenidos para SSED bajo las condiciones evaluadas. En la gráfica se observan los porcentajes de remoción con cada una de las especies vegetales empleadas. Fuente: Autores, 2016.

Tabla 15*Resultados para grasas y aceites*

GRASAS Y ACEITES							
Standard Methods 5520 B							
Unidad: mg/L							
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluyente (mg/L)	Valor efluente (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida (mg/L)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	80	31,7	60,37	48,3
		25	120	79	24,8	68,60	54,2
		12,5	48	72	20,4	71,66	51,6
		12,5	120	72	12,5	82,63	59,5
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	80	32,1	59,87	47,9
		25	120	79	24,2	69,36	54,8
		12,5	48	72	15,7	78,18	56,3
		12,5	120	72	8,7	87,91	63,3
3	<i>Costus spicatus</i> y <i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	80	32,6	59,25	47,4
		25	120	79	25,3	67,97	53,7
		12,5	48	72	18,2	74,72	53,80
		12,5	120	72	10,1	85,97	61,9

Nota. La tabla muestra la relación de grasas y aceites antes y después del tratamiento, determinando el porcentaje de remoción y la cantidad removida por cada unidad experimental. Fuente: Autores, 2016.

A las grasas y aceites se les concede especial atención por su escasa solubilidad en el agua, su bajo peso específico y su tendencia a separarse de la fase acuosa. Su presencia causa iridiscencia, problemas de mantenimiento, complica el transporte por las tuberías y su disposición en aguas receptoras e interfieren en la actividad biológica pues son difíciles de degradar (Romero J. A., 2002), Además altera su calidad estética (olor y apariencia).

Para la remoción de grasas y aceites influyó el volumen de agua trabajado, siendo el de mejores resultados 12,5L como muestra la figura 29. De las mediciones se aprecia que al aumentar el tiempo de retención también aumenta el porcentaje de remoción (relación

directamente proporcional), por lo que se determina que a menor cantidad de volumen y mayor tiempo de retención, mejores son los resultados. La condición más favorable se da a 12,5L-120h, donde las unidades experimentales obtuvieron sus mejores resultados. Para este caso la *C. spicatus* removi6 un 82,6%, mientras que la *H. psittacorum* super6 este valor removiendo el 87,9%, dejando la unidad experimental combinada con una remoci6n intermedia del 85,9%.

El VLMP para grasas y aceites estipulado en el art6culo 15 de la resoluci6n 0631 es de 10 mg/L. Al compararlo con los efluentes de la tabla 15, a pesar de que las remociones fueron superiores al 60%, se observa que solo la unidad experimental 2 bajo las condiciones de 12,5L-120h cumple con lo establecido, presentando una carga menor de 8,7 mg/L. La tabla 15 muestra que se trabaj6 afluentes con cargas de 70 mg/L a 80 mg/L, ya que son afluentes sin ning6n tipo de pretratamiento, por tanto se recomienda que para cargas iguales o mayores, se haga uso de trampas de grasa o unidades de flotaci6n antes de ingresar al humedal artificial con el fin de disminuir la concentraci6n de dichas sustancias.

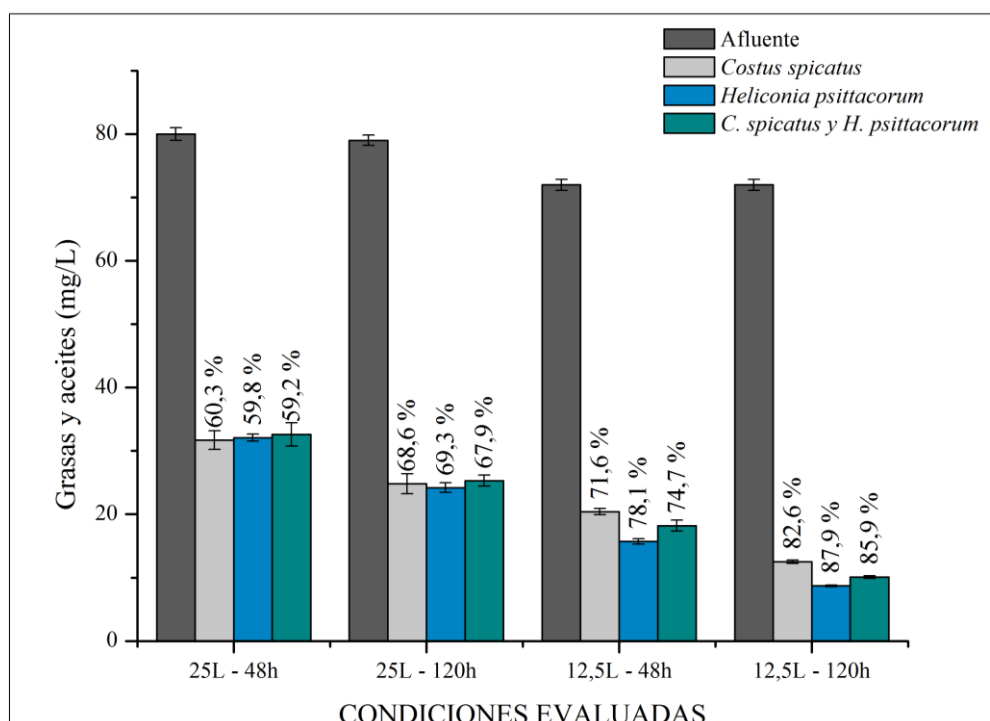


Figura 29. Resultados obtenidos para grasas y aceites bajo las condiciones evaluadas. En la gr6fica se observan los porcentajes de remoci6n con cada una de las especies vegetales empleadas. Fuente: Autores, 2016.

El fósforo es esencial para el desarrollo de diversos organismos; por lo que la descarga de fosfatos en cuerpos de aguas puede estimular el crecimiento, especialmente de organismos fotosintéticos en grandes cantidades, causando eutrofización de las aguas (Cárdenas, 2005). En las tablas 16 y 17 se muestran los resultados para fosfatos y fósforo total.

Tabla 16

Resultados para fosfatos

FOSFATOS							
Standard Methods 8048 Unidad: mg/L PO ₄ ³⁻				Espectrofotómetro UV-Visible DR 6000 Procedimiento: 490			
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluyente (mg/L)	Valor efluente (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida (mg/L)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	5,73	1,68	70,68	4,05
		25	120	5,70	2,82	50,52	2,88
		12,5	48	5,86	2,93	50,00	2,93
		12,5	120	5,86	1,86	68,25	4,00
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	5,73	0,61	89,35	5,12
		25	120	5,70	2,70	52,63	3,00
		12,5	48	5,86	1,54	73,72	4,32
3	<i>Costus spicatus</i> y	12,5	120	5,86	0,81	86,17	5,07
		25	48	5,73	1,43	75,04	4,30
	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	120	5,70	2,74	51,92	2,96
		12,5	48	5,86	2,10	64,16	3,76
		12,5	120	5,86	1,06	81,91	4,80

Nota. La tabla muestra la relación de fosfatos antes y después del tratamiento, determinando el porcentaje de remoción y la cantidad removida por cada unidad experimental. Fuente: Autores, 2016.

Las formas de fosfatos provienen de fuentes como productos de limpieza (detergentes, jabones, etc.), fertilizantes, procesos biológicos, entre otros. Aunque (Cartró, 2003) afirma que sólo una pequeña parte se origina en forma natural de los fosfatos

derivados del propio detritus. La figura 30 muestra los resultados obtenidos en la remoción de fosfatos. Se evidencia que el comportamiento de las especies en cuanto a remoción bajo las condiciones de 12,5L, es mejor al aumentar el tiempo de retención (de 48h a 120h), en donde la *C. spicatus* incrementó la remoción de 50,0% a 68,2%, la *H. psittacorum* de 73,7% a 86,1% y la combinación de estas de 64,1% a 81,9%.

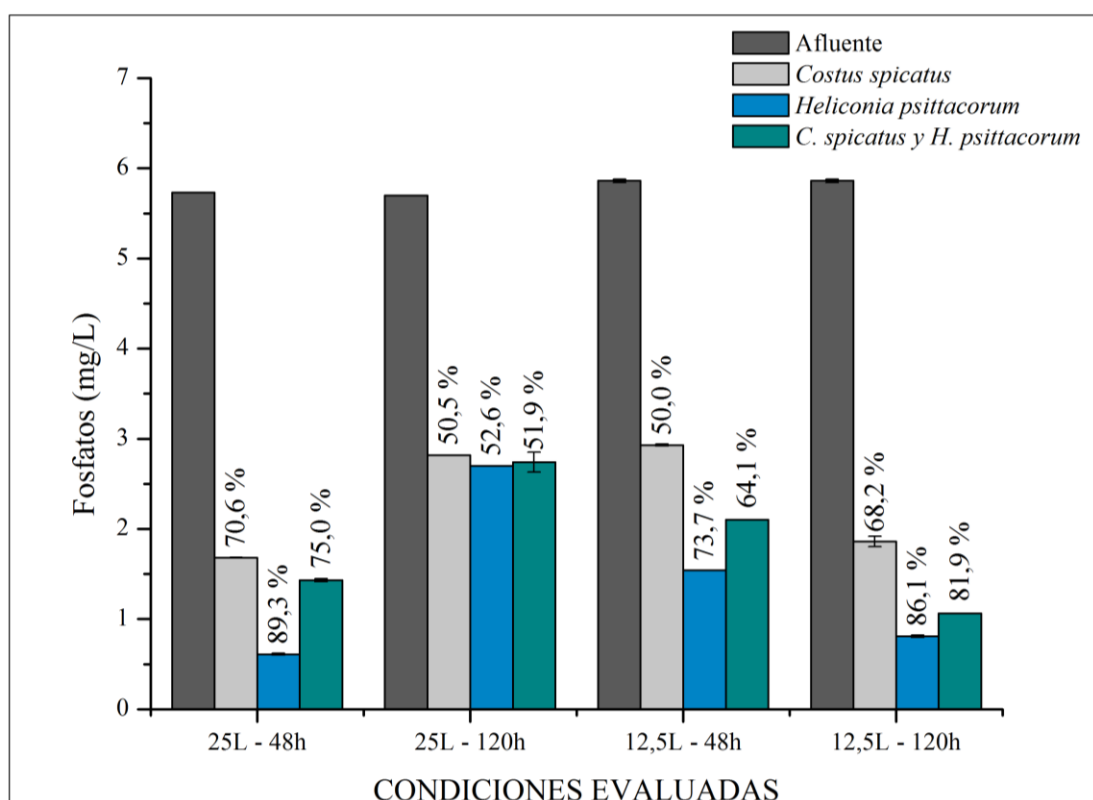


Figura 30. Resultados obtenidos para fosfatos bajo las condiciones evaluadas. En la gráfica se observan los porcentajes de remoción con cada una de las especies vegetales empleadas. Fuente: Autores, 2016.

Para las condiciones trabajadas con 25L, se observa que a 48h hay una remoción mayor que a 120h, este caso específico es debido a que en la primera medición (25L-48h) los fosfatos son asimilados inmediatamente por las especies vegetales provenientes de un medio con concentraciones medias de fosfatos, así mismo se sedimentó y el medio filtrante retuvo mayor cantidad de fosfatos, saturando el medio, por lo que en las demás mediciones los porcentajes de remoción fueron más estables.

Los fosfatos pueden unirse con óxidos de Fe y Al a través de absorción química y precipitarse para formar un nuevo mineral compuesto (fosfatos de Fe y Al), que son potencialmente muy estables en el suelo, produciendo el almacenamiento de fósforo a largo plazo (Llagas C. y Guadalupe G., 2006).

Para los fosfatos y fósforo total, el artículo 15 de la resolución 0631 es flexible en su VLMP, exigiendo solo el análisis y reporte de los vertimientos. Esto muestra lo permisiva que es la normativa para este tipo de sustancias, sin embargo para la conservación del recurso hídrico se hace pertinente que la carga sea la menor posible.

Tabla 17

Resultados para fósforo total

FÓSFORO TOTAL							
Standard Methods 8048 Unidad: mg/L P				Espectrofotómetro UV-Visible DR 6000 Procedimiento: 490			
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluyente (mg/L)	Valor efluente (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida (mg/L)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	1,91	0,56	70,68	1,35
		25	120	1,90	0,94	50,52	0,96
		12,5	48	1,95	0,97	50,25	0,98
		12,5	120	1,95	0,62	68,20	1,33
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	1,91	0,20	89,52	1,71
		25	120	1,90	0,90	52,63	1,00
		12,5	48	1,95	0,51	73,84	1,44
3	<i>Costus spicatus</i> y <i>Heliconia psittacorum</i>	12,5	120	1,95	0,26	86,66	1,69
		25	48	1,91	0,47	75,39	1,44
		25	120	1,90	0,91	52,10	0,99
		12,5	48	1,95	0,70	64,10	1,25
		12,5	120	1,95	0,35	82,05	1,60

Nota. La tabla muestra la relación de fósforo total antes y después del tratamiento, determinando el porcentaje de remoción y la cantidad removida por cada unidad experimental.
Fuente: Autores, 2016.

Según Karl-Slevogt-Straße (2004), el fósforo se presenta de tres formas en el agua: ortofosfato inorgánico, compuestos orgánicos de fósforo y fósforo en partículas, la suma de los tres tipos es considerada como el contenido de fósforo total. Este es un parámetro importante a considerar puesto que son nutrientes esenciales que favorecen el crecimiento de la vida acuática no deseada (eutrofización) (Delgadillo et al., 2010).

Los resultados obtenidos en la remoción de este elemento se muestran en la figura 31, donde se observa un comportamiento similar al de los fosfatos. De esta gráfica se infiere que bajo las condiciones de 12,5L, al igual que en los fosfatos, la remoción es mejor al aumentar el tiempo de retención, incrementándose de 50,2% a 68,2% para *C. spicatus*, de 73,8% a 86,6% para la *H. psittacorum* y de 64,1% a 82,0% para la plantación combinada de estas especies.

Bajo el volumen de 25L se presenta una remoción más alta a las 48h que a las 120h, este debido a las mismas razones expuestas en el apartado de los fosfatos. En la segunda medición (25L-120h), a pesar de aumentar el tiempo, la remoción de fósforo es mínima debido a las limitadas oportunidades de contacto del agua residual con el suelo, ya que en la primera medición se ha saturado el medio filtrante con este elemento, por tanto se requieren largos periodos de retención para producir bajos niveles de fósforo lo que concuerda con lo descrito por la United States Environmental Protection Agency (US-EPA, 2000a) y (Vymazal & Kropfelova, 2008).

Los principales mecanismos para la remoción de fósforo son la captación por parte de las plantas y la retención en el terreno, afirma Lara Borrero (1999). Para hacer más efectiva la eliminación de fósforo en los humedales Gómez, Suárez, y Vidal (2001) sugieren el uso de grandes áreas con grava rica en hierro y aluminio o tratamientos alternativos de eliminación de fósforo.

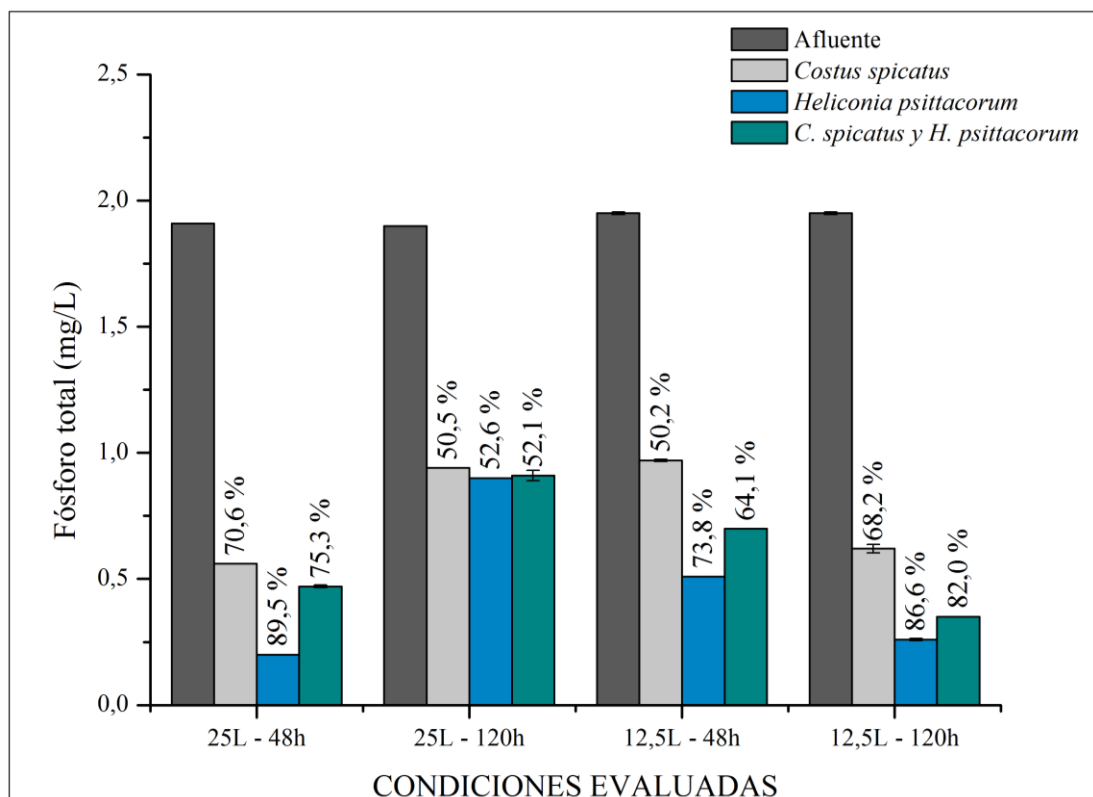


Figura 31. Resultados obtenidos para fósforo total bajo las condiciones evaluadas. En la gráfica se observan los porcentajes de remoción con cada una de las especies vegetales empleadas. Fuente: Autores, 2016.

El nitrógeno es otro nutriente, que al igual que el fósforo puede producir eutrofización. El nitrógeno en las aguas residuales se puede presentar principalmente en forma orgánica, como parte de proteínas, o en forma amoniacal (Ortíz M, 2011). Al momento que ingresa agua residual al humedal construido, la mayor parte del nitrógeno está presente como amonio o en forma de un compuesto inestable, que es fácilmente transformado a amonio. En los humedales puede eliminarse el nitrógeno mediante procesos como nitrificación/desnitrificación y posterior pérdida de gas a la atmósfera (Delgadillo et al., 2010).

La desnitrificación está considerada como el principal proceso de eliminación de nitrógeno, este proceso es esencialmente anóxico y se lleva a cabo por bacterias heterótrofas facultativas (Plaza de los Reyes, Vera, Salvato, Borin, & Vidal, 2001).

La mayoría de autores difieren en cuanto al porcentaje de remoción de los compuestos de nitrógeno. Según Lara Borrero (1999) la remoción de nitrógeno en humedales artificiales esta entre un 25% y un 85%, por otra parte (Plaza de los Reyes et al., 2001) afirman que los humedales artificiales son capaces de eliminar entre un 60 y 80% del nitrógeno total presente, más recientemente Londoño y Marín (2009) afirman que la remoción de nitrógeno puede ser muy efectiva alcanzando valores por encima del 80%, por último Suárez, Agudelo, Rincón, y Millán (2014) certifican en su estudio remociones de más del 90% de nitrógeno amoniacal.

Sin embargo, estas eficiencias van ligadas a las especies de macrófitas empleadas, a las características del afluente, a las condiciones climáticas, a la incidencia en los procesos microbiológicos involucrados, al volumen tratado, al tiempo de retención y en general al tipo de configuración aplicada.

Para los compuestos de nitrógeno (nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal y nitrógeno total), el artículo 15 de la resolución 0631 no establece un valor límite máximo permisible, requiriendo solo el análisis y reporte de los vertimientos. Nuevamente se observa que la norma no es rigurosa en la exigencia y control de algunos parámetros. No obstante, la gestión ambiental nos permite establecer soluciones alternativas como este tratamiento para disminuir al máximo las cargas contaminantes de los vertimientos, con el fin de preservar el recurso y su calidad.

Para los diferentes compuestos de nitrógeno tales como nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal y nitrógeno total Kjeldahl, se observan los resultados en las tablas 18, 19, 20 y 21 respectivamente.

Tabla 18*Resultados para nitratos*

NITRATOS							
Standard Methods 8039				Espectrofotómetro UV-Visible DR 6000			
Unidad: mg/L NO ₃ ⁻				Procedimiento: 355			
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluyente (mg/L)	Valor efluente (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida (mg/L)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	41,65	39,48	5,21	0,15
		25	120	36,81	23,90	35,07	12,91
		12,5	48	47,08	22,44	52,33	24,61
		12,5	120	47,08	14,08	70,09	33,00
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	41,65	33,00	20,76	8,65
		25	120	36,81	23,32	36,64	13,49
		12,5	48	47,08	9,24	80,37	37,84
		12,5	120	47,08	4,48	90,48	42,6
3	<i>Costus spicatus</i> y <i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	41,65	38,13	8,45	3,52
		25	120	36,81	25,66	30,56	11,15
		12,5	48	47,08	18,48	60,74	28,6
		12,5	120	47,08	13,2	71,96	33,88

Nota. La tabla muestra la relación de nitratos antes y después del tratamiento, determinando el porcentaje de remoción y la cantidad removida por cada unidad experimental. Fuente: Autores, 2016.

La presencia de cantidades excesivas de nitrato en el agua constituye un factor de riesgo para la salud, debido a que éstos se reducen con facilidad a nitritos, agentes tóxicos descritos más adelante. En la figura 32 se evidencia gran diferencia en el porcentaje de remoción para cada una de las condiciones evaluadas, también se observa que para cada condición el mejor desempeño fue dado por la *H. psittacorum*. Las condiciones más favorables debido a su remoción son las realizadas con 12,5L, esto quiere decir que el volumen del agua residual interviene en su capacidad depuradora, resultando tener un mejor comportamiento a menor cantidad. De igual manera, el tiempo interviene en la

remoción, ya que para cada volumen se observa una mayor remoción cuando se aumenta el tiempo de retención.

La remoción de nitratos por desnitrificación biológica es efectiva dado que las condiciones anóxicas requeridas están siempre presentes y se cuenta con suficientes fuentes de carbono (US-EPA, 2000a). Los mejores porcentajes de remoción para las tres unidades experimentales se dieron a 12,5L y 120h, en donde la *C. spicatus* removió el 70%, la *H. psittacorum* 90,4% y las plantación combinada el 71,9%.

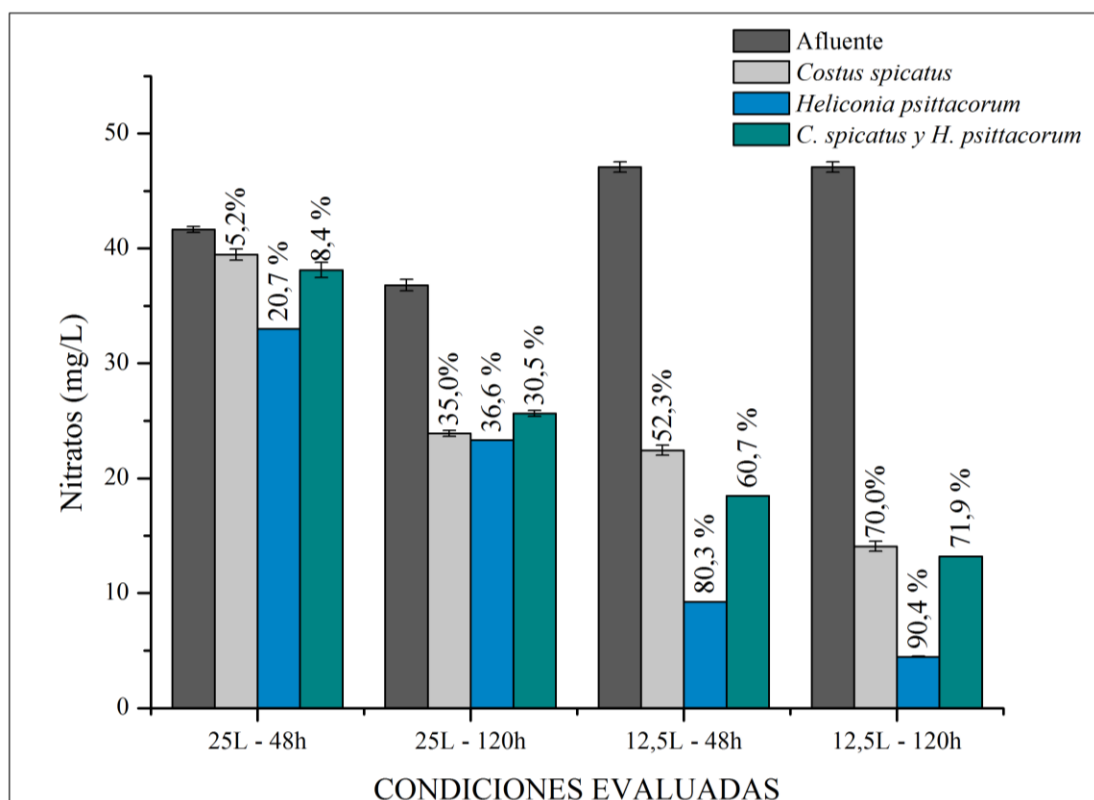


Figura 32. Resultados obtenidos para nitratos bajo las condiciones evaluadas. En la gráfica se observan los porcentajes de remoción con cada una de las especies vegetales empleadas. Fuente: Autores, 2016.

Tabla 19*Resultados para nitritos*

NITRITOS							
Standard Methods 8507				Espectrofotómetro UV-Visible DR 6000			
Unidad: mg/L NO ₂ ⁻				Procedimiento: 371			
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluyente (mg/L)	Valor efluente (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida (mg/L)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	68,2	60,5	11,29	7,7
		25	120	58,3	33,0	43,39	25,3
		12,5	48	73,0	34,1	53,28	38,9
		12,5	120	73,0	29,7	59,31	43,3
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	68,2	58,3	14,51	9,9
		25	120	58,3	29,7	49,05	28,6
		12,5	48	73,0	13,5	81,50	59,5
		12,5	120	73,0	9,9	86,43	63,1
3	<i>Costus spicatus</i> y <i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	68,2	58,7	13,92	9,5
		25	120	58,3	33,7	42,19	24,6
		12,5	48	73,0	20,6	71,78	52,4
		12,5	120	73,0	16,5	77,39	56,5

Nota. La tabla muestra la relación de nitritos antes y después del tratamiento, determinando el porcentaje de remoción y la cantidad removida por cada unidad experimental. Fuente: Autores, 2016.

Los nitritos son los principales indicadores de contaminación por descomposición orgánica en el agua. Su presencia constituye un factor de riesgo para la salud ya que inducen la enfermedad de hemoglobinemia, principalmente en la población infantil. En la figura 33 se observa gran diferencia en las remociones bajo las condiciones de 25L y 12,5L, lo que sugiere que al igual que en los nitratos se presenta una mejor remoción con el menor volumen e igualmente a mayor tiempo. Esta condición fue la más favorable para la disminución de nitritos, arrojando el mejor resultado la *H. psittacorum* con 86,4%, seguido por la unidad combinada 77,3% y por último la *C. spicatus* con 59,3%.

La *H. psittacorum* continua removiendo mejor a comparación de la *C. spicatus*, probablemente por mayor translocación de oxígeno a la rizósfera, lo que estimula la nitrificación/desnitrificación como afirma el estudio hecho por Gutierrez Mosquera et al., (2010).

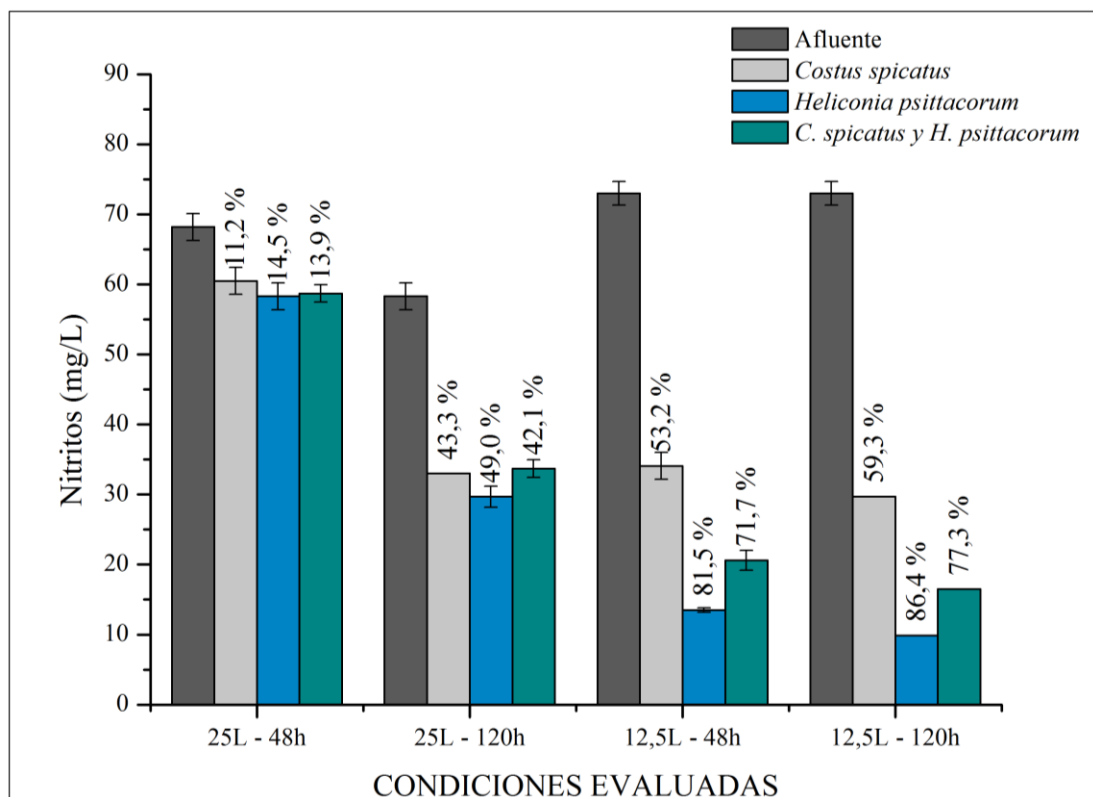


Figura 33. Resultados obtenidos para nitritos bajo las condiciones evaluadas. En la gráfica se observan los porcentajes de remoción con cada una de las especies vegetales empleadas. Fuente: Autores, 2016.

Tabla 20*Resultados para nitrógeno amoniacal*

NITRÓGENO AMONICAL							
Standard Methods 8038 Unidad: mg/L NH ₃ /NH ₄ ⁺				Espectrofotómetro UV-Visible DR 6000 Procedimiento: 380			
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluyente (mg/L)	Valor efluente (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida (mg/L)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	2,05	0,73	64,39	1,32
		25	120	1,98	0,67	66,16	1,31
		12,5	48	2,33	0,85	63,52	1,48
		12,5	120	2,33	0,80	65,67	1,53
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	2,05	0,65	68,29	1,40
		25	120	1,98	0,55	72,22	1,43
		12,5	48	2,33	0,53	77,25	1,80
		12,5	120	2,33	0,36	84,55	1,97
3	<i>Costus spicatus</i> y <i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	2,05	0,63	69,27	1,42
		25	120	1,98	0,54	72,73	1,44
		12,5	48	2,33	0,56	75,97	1,77
		12,5	120	2,33	0,60	74,25	1,73

Nota. La tabla muestra la relación de nitrógeno amoniacal antes y después del tratamiento, determinando el porcentaje de remoción y la cantidad removida por cada unidad experimental.

Fuente: Autores, 2016.

Las aguas residuales tienden a tener grandes cantidades de nitrógeno amoniacal debido a la urea recibida de las unidades sanitarias, este parámetro en altas concentraciones resulta nocivo para muchos microorganismos. Para el nitrógeno amoniacal se observa en la figura 34 remociones entre el rango de 63,5% al 84,5%. Sin embargo la *H. psittacorum* sigue presentándose con mejor potencial removiendo en el mejor de los casos el 84,5%, el mejor resultado para la *C. spicatus* fue de 66,1% y para la combinada 75,9%. Estos resultados se dieron en tres condiciones diferentes, lo que muestra que el volumen y tiempo de retención no influyó radicalmente para la remoción de nitrógeno amoniacal.

La presencia de las macrófitas juega un papel muy importante en la translocación de oxígeno a las zonas profundas del humedal, ya que la disponibilidad limitada de O_2 en los humedales de flujo subsuperficial disminuye la capacidad de remoción por nitrificación biológica (US-EPA, 2000a), por tanto proporciona condiciones secuenciales aerobias y anaerobias para que las bacterias nitrificantes transformen el N amoniacal en nitritos y nitratos en las zonas aireadas, y las bacterias desnitrificantes transformen los nitratos y nitritos en N gaseoso en las zonas anaerobias (Cárdenas Sánchez, 2012; OPS/OMS 1999).

Otro proceso relacionado con la eliminación de nitrógeno es la asimilación o incorporación a los tejidos vegetales que se refiere a procesos biológicos que convierten formas de nitrógeno inorgánicas en compuestos orgánicos que sirven como componentes básicos para células y tejidos. Las dos formas de nitrógeno más utilizadas en la asimilación son el nitrato y el amonio (Plaza de los Reyes et al., 2001). Sin embargo, en los procesos asimilativos, la fuente de nitrógeno con mayor uso es la de nitrógeno amoniacal, debido a su estado energético reducido (Kadlec & Knight, 1996).

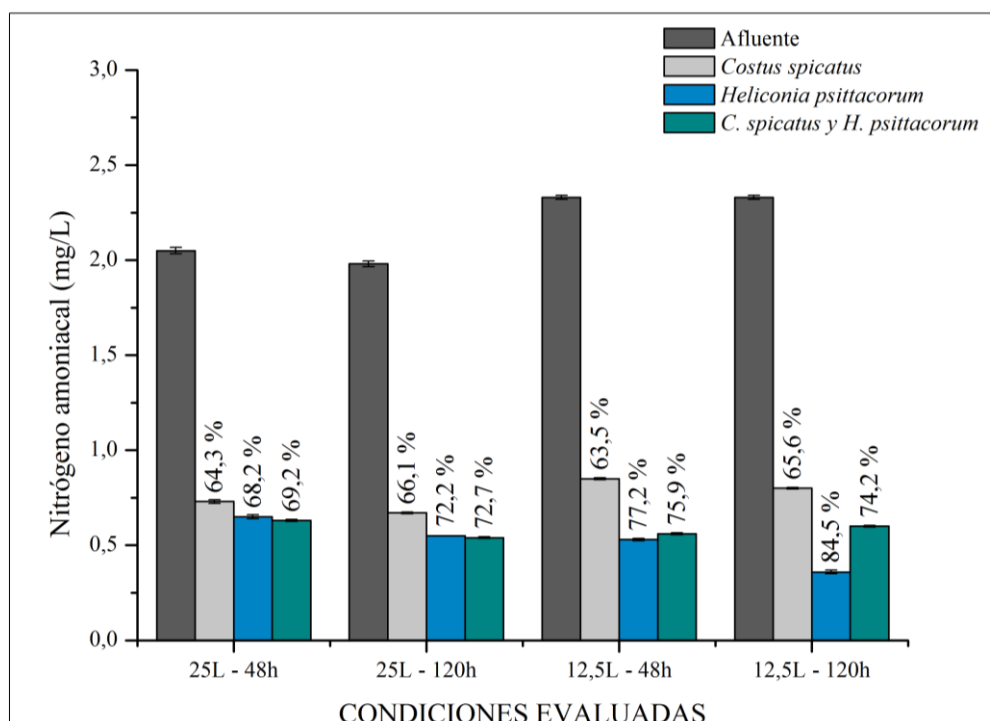


Figura 34. Resultados obtenidos para nitrógeno amoniacal bajo las condiciones evaluadas. En la gráfica se observan los porcentajes de remoción con cada una de las especies vegetales empleadas. Fuente: Autores, 2016.

Tabla 21*Resultados para nitrógeno total*

NITRÓGENO TOTAL							
Standard Methods 4500 NT / Titrimétrico – Kjeldahl							
Unidad: mg/L							
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluyente (mg/L)	Valor efluente (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida (mg/L)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	97,38	16,67	82,88	80,71
		25	120	98,04	16,00	83,68	82,04
		12,5	48	101,38	16,00	84,22	85,38
		12,5	120	101,38	20,01	80,26	81,37
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	97,38	14,67	84,94	82,71
		25	120	98,04	18,10	81,54	79,94
		12,5	48	101,38	15,34	84,87	86,04
		12,5	120	101,38	18,67	81,58	82,71
3	<i>Costus spicatus</i> y <i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	97,38	14,67	84,94	82,71
		25	120	98,04	25,34	74,15	72,70
		12,5	48	101,38	14,00	86,19	87,38
		12,5	120	101,38	18,01	82,24	83,37

Nota. La tabla muestra la relación de nitrógeno total antes y después del tratamiento, determinando el porcentaje de remoción y la cantidad removida por cada unidad experimental. Fuente: Autores, 2016.

El nitrógeno total está compuesto por nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos y nitrógeno orgánico. Para el nitrógeno total como nos indica la figura 35, se presentan altas remociones en todas las condiciones evaluadas oscilando entre un 74,15% a 86,19%, lo que muestra en este parámetro un rango de diferencia menor a comparación de los demás. La mejor remoción presentada por la *C. spicatus* fue de 84,2%, para la *H. psittacorum* 84,8%, y para la combinada 86,1%. De esta manera se observa que el humedal subsuperficial con las especies empleadas es una alternativa viable con remociones sobresalientes de nitrógeno total.

Para la remoción de nitrógeno total fue importante la presencia de las macrófitas ya que además de que sus raíces proporcionan sustrato para los procesos microbiológicos, transmiten oxígeno de las hojas a las raíces propiciando microzonas aeróbicas en la superficie de las raíces y los rizomas (Castillo & Collado, 1996; US-EPA, 2000b).

Se recomienda una investigación sobre las partes asimiladoras de nitrógeno de las dos especies empleadas, especialmente para la *C. spicatus* que carece de estudios con potencial fitorremediador. Mientras que para la *H. psittacorum* un estudio realizado por Gutierrez Mosquera et al., (2010) encontró que la mayor asimilación de N ocurre en las hojas y las raíces, mientras que una desasimilación de N fue observada en el tallo, también encontraron una mejor eliminación de N al aumentar el tiempo de retención.

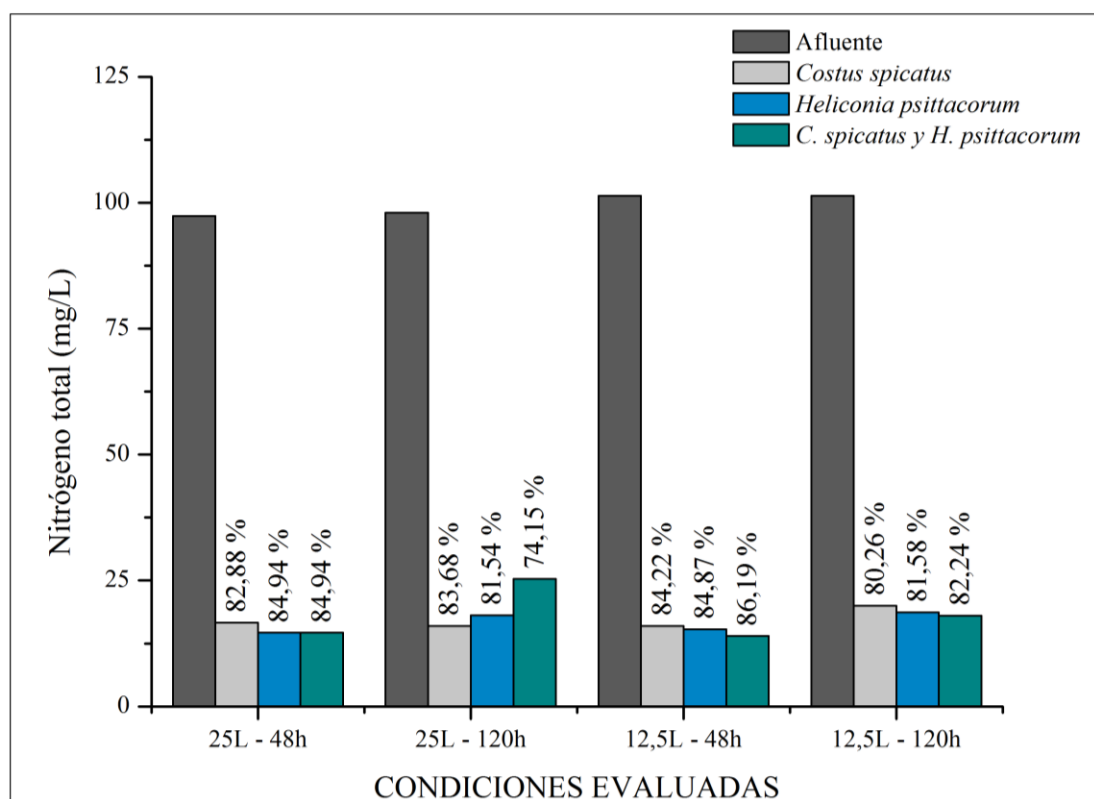


Figura 35. Resultados obtenidos para nitrógeno total bajo las condiciones evaluadas. En la gráfica se observan los porcentajes de remoción con cada una de las especies vegetales empleadas. Fuente: Autores, 2016.

El grupo de iones que se analizaron en este proyecto son los fluoruros y sulfatos los cuales se muestran en las tablas 22 y 23 respectivamente.

Tabla 22

Resultados para fluoruros

FLUORUROS							
Standard Methods 10225 Unidad: mg/L F ⁻				Espectrofotómetro UV-Visible DR 6000 Procedimiento: 190			
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluente (mg/L)	Valor efluente (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida (mg/L)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	1,74	0,27	84,48	1,47
		25	120	1,28	0,26	79,68	1,02
		12,5	48	1,38	0,19	86,23	1,19
		12,5	120	1,38	0,16	88,40	1,22
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	1,74	0,27	84,48	1,47
		25	120	1,28	0,25	80,46	1,03
		12,5	48	1,38	0,18	86,95	1,20
		12,5	120	1,38	0,14	89,85	1,24
3	<i>Costus spicatus</i> y	25	48	1,74	0,44	74,71	1,30
		25	120	1,28	0,36	71,87	0,92
	<i>Heliconia psittacorum</i>	12,5	48	1,38	0,20	85,50	1,18
		12,5	120	1,38	0,19	86,23	1,19

Nota. La tabla muestra la relación de fluoruros antes y después del tratamiento, determinando el porcentaje de remoción y la cantidad removida por cada unidad experimental. Fuente: Autores, 2016.

La presencia de fluoruros en el agua residual se debe generalmente a actividades industriales como la fabricación de metales, acero, plásticos o fertilizantes (Barrenechea Martel, 2012), y sus elevadas concentraciones hacen necesario aplicar tratamientos para reducirla y minimizar su efecto. El método convencional para la eliminación de fluoruros presentes en las aguas residuales es la precipitación química (Irabien Gulías, Garea Vásquez, Aldaco Garcia, Pérez Barrio, & Sáenz Rodrigo, 2007). En la figura 36 se puede

ver que el porcentaje de remoción bajo todas las condiciones evaluadas, estuvo sobre el 70%, siendo un muy buen resultado para este parámetro. El mejor de los casos fue en las condiciones de 12,5L y 120h donde la remoción para la *C. spicatus* fue de 88,4%, *H. psittacorum* 89,8% y la combinación de las especies 86,2%.

En los vertimiento la cantidad de fluoruros permitida por la normatividad colombiana es de 5,0 mg/L, lo que indica que los afluentes se encontraban por debajo de este rango cumpliendo lo establecido, además de eso, luego de pasar por el tratamiento disminuyó aún más la concentración (>70%) eliminando y neutralizando notoriamente el riesgo potencial para el medio ambiente, la fauna acuática y la salud humana.

Por otra parte, este sistema presenta una alternativa que disminuye costos, minimiza lodos y uso de reactivos en la precipitación química y generación de subproductos como los fluoruros cálcicos (Simón, 2007).

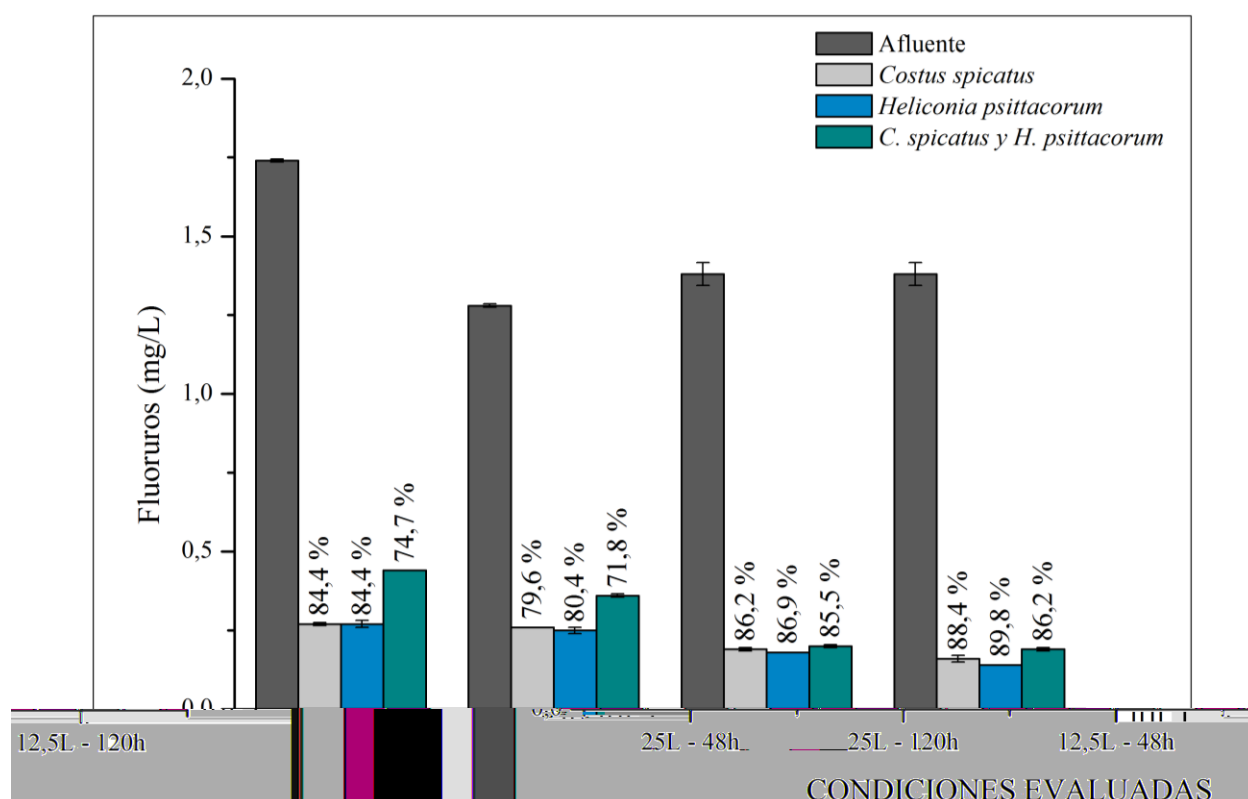


Figura 36. Resultados obtenidos para fluoruros bajo las condiciones evaluadas. En la gráfica se observan los porcentajes de remoción con cada una de las especies vegetales empleadas. Fuente: Autores, 2016.

Tabla 23*Resultados para sulfatos*

SULFATOS							
Standard Methods 8051 Unidad: mg/L SO ₄ ²⁻				Espectrofotómetro UV-Visible DR6000 Procedimiento: 680			
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluyente (mg/L)	Valor efluente (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida (mg/L)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	25,6	24	6,25	1,60
		25	120	22,3	5,6	74,89	16,70
		12,5	48	34	24,3	28,53	9,70
		12,5	120	34	21,3	37,35	12,70
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	25,6	22,6	11,72	3,00
		25	120	22,3	4,3	80,72	18,00
		12,5	48	34	23	32,35	11,00
		12,5	120	34	15,6	54,12	18,40
3	<i>Costus spicatus</i> y <i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	25,6	23,0	10,16	2,60
		25	120	22,3	5,0	77,58	17,30
		12,5	48	34	25,3	25,59	8,70
		12,5	120	34	18	47,06	16,00

Nota. La tabla muestra la relación de sulfatos antes y después del tratamiento, determinando el porcentaje de remoción y la cantidad removida por cada unidad experimental. Fuente: Autores, 2016.

El azufre se encuentra en el agua como ion sulfato SO₄⁻² (Rocha Castro, 2010), este es un ion común en aguas residuales que en condiciones anaeróbicas origina problemas de olor y corrosión de alcantarillas, además tienden a formar incrustaciones en las calderas y en los intercambiadores de calor (Romero J. A., 2002; IDEAM, 2007).

Como se muestra en la figura 37 hubo remociones bajas a excepción de la condición de 25L y 120h, dando para la *C. spicatus* un 74,8% para la *H. psittacorum* 80,7% y la unidad experimental con ambas especies 77,5%.

Como los sulfatos de sodio y de magnesio tienen un efecto purgante, especialmente entre los niños, la OMS recomienda como límite en el agua 250 mg/L.

La concentración más alta de sulfatos en el afluente es de 34 mg/L estando por debajo del valor permitido, sin embargo si este superara las concentraciones permitidas, la carga de sulfatos es disminuida gracias al tratamiento, favoreciendo el cumplimiento de la normatividad que establece como VLMP 250 mg/L.

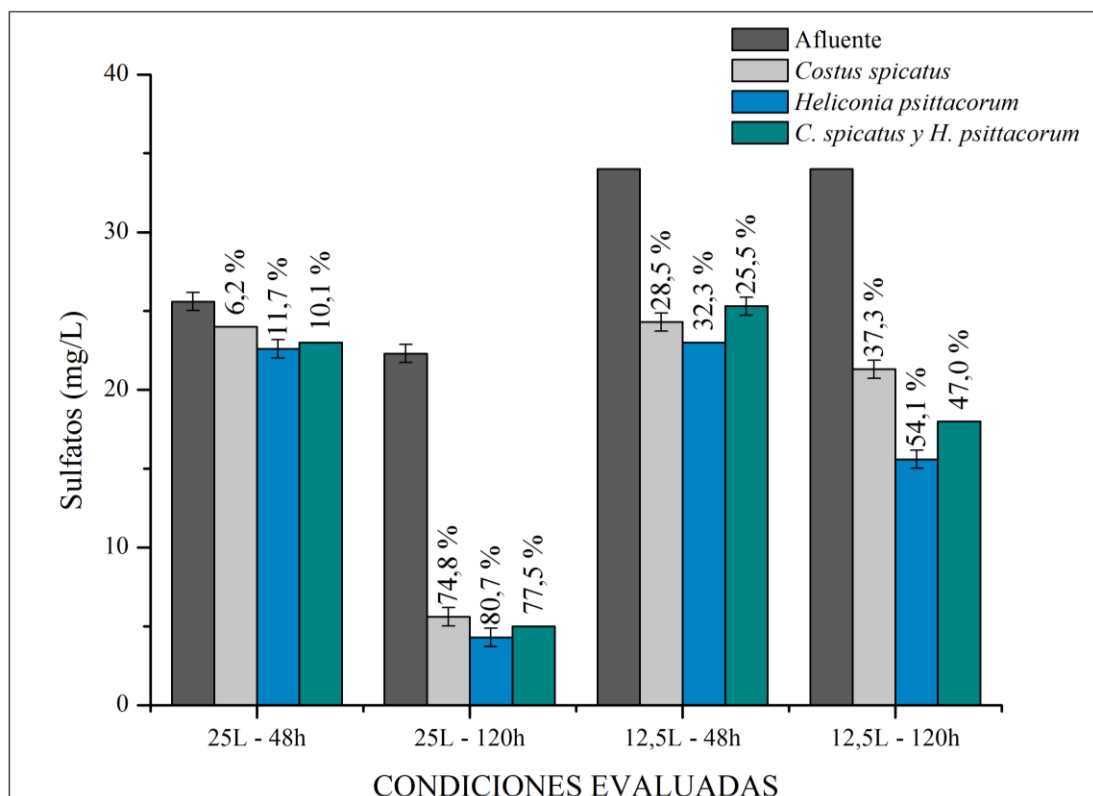


Figura 37. Resultados obtenidos para sulfatos bajo las condiciones evaluadas. En la gráfica se observan los porcentajes de remoción con cada una de las especies vegetales empleadas. Fuente: Autores, 2016.

Para Karsten, Gjengedal, & Røysetb (2007), los metales pesados pueden ser tóxicos para los ecosistemas acuáticos, terrestres y la salud humana, aunque las concentraciones de metales pesados en aguas residuales domésticas son casi insignificantes, la situación es contraria para los residuos líquidos industriales y por tal razón es de gran importancia dar una solución para la remoción de los mismos. En las tablas 24, 25 y 26 se muestran los resultados para aluminio, cobre y hierro.

Tabla 24*Resultados para aluminio*

ALUMINIO							
Standard Methods 8012				Espectrofotómetro UV-Visible DR6000			
Unidad: mg/L Al ³⁺				Procedimiento: 10			
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluyente (mg/L)	Valor efluente (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida (mg/L)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	0,047	0,010	78,72	0,037
		25	120	0,050	0,032	36,00	0,018
		12,5	48	0,086	0,066	23,25	0,020
		12,5	120	0,086	0,031	63,95	0,055
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	0,047	0,010	78,72	0,037
		25	120	0,050	0,019	62,00	0,031
		12,5	48	0,086	0,031	63,95	0,055
		12,5	120	0,086	0,022	74,41	0,064
3	<i>Costus spicatus</i> y <i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	0,047	0,011	76,60	0,036
		25	120	0,050	0,024	52,00	0,026
		12,5	48	0,086	0,045	47,67	0,04
		12,5	120	0,086	0,028	67,44	0,058

Nota. La tabla muestra la relación de aluminio antes y después del tratamiento, determinando el porcentaje de remoción y la cantidad removida por cada unidad experimental. Fuente: Autores, 2016.

El aluminio es el elemento metálico más abundante en la tierra pero no se encuentra en su forma libre en la naturaleza (Berra Gasca, 2015). Según la empresa (COALUM SAS) es causante de los problemas de acidificación. Como se muestra en la figura 38, se concluye que los niveles de aluminio en el afluyente aumentan al pasar el tiempo ya que las concentraciones de este metal en el agua residual entrante son mayores a la capacidad de asimilación y/o absorción por parte de las plantas, por tanto al transcurrir el tiempo se presenta una saturación del medio, consiguiéndose los mejores resultados en la primera

medición (25L-48h) con remociones mayores al 75%, dándose para la *C. spicatus* 78,7%, la *H. psittacorum* 78,7% y la combinación de estas el 76,6%.

La normatividad colombiana no se exige un VLMP para el aluminio en los vertimientos de aguas residuales, la resolución 0631 de 2015 establece para este parámetro el análisis y reporte, a pesar de ser un elemento tóxico para el medio ambiente y el ser humano, al concentrarse en las plantas y causar daños en la salud de los animales que las consumen y por acidificar los cuerpos de agua y disminuir la población de peces y anfibios como lo señala Berra Gasca (2015).

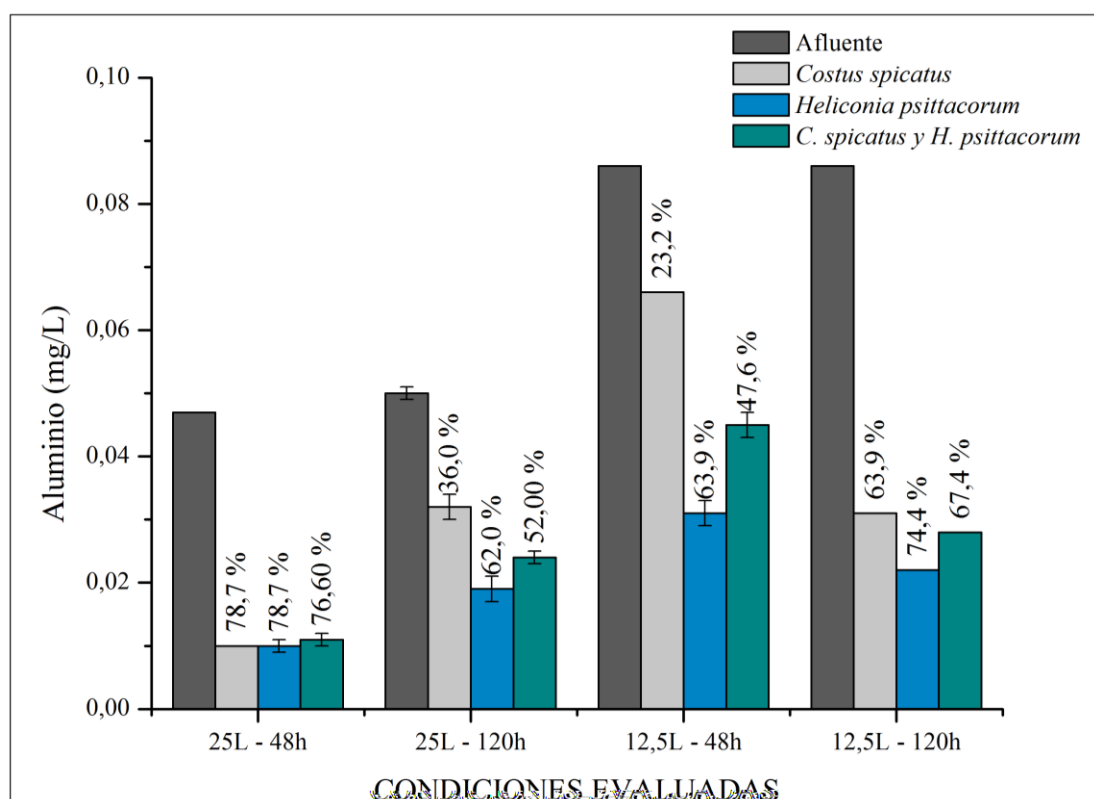


Figura 38. Resultados obtenidos para aluminio bajo las condiciones evaluadas. En la gráfica se observan los porcentajes de remoción con cada una de las especies vegetales empleadas. Fuente: Autores, 2016.

Tabla 25*Resultados para cobre*

COBRE							
Standard Methods 8506 Unidad: mg/L Cu				Espectrofotómetro UV-Visible DR 6000 Procedimiento: 135			
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluyente (mg/L)	Valor efluente (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida (mg/L)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	1,35	0,44	67,41	0,91
		25	120	1,69	1,58	6,51	0,11
		12,5	48	1,92	1,45	24,48	0,47
		12,5	120	1,92	1,05	45,31	0,87
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	1,35	0,31	77,04	1,04
		25	120	1,69	0,89	47,34	0,8
		12,5	48	1,92	0,35	81,77	1,57
		12,5	120	1,92	0,26	86,46	1,66
3	<i>Costus spicatus</i> y <i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	1,35	0,39	71,11	0,96
		25	120	1,69	1,40	17,16	0,29
		12,5	48	1,92	1,47	23,44	0,45
		12,5	120	1,92	0,71	63,02	1,21

Nota. La tabla muestra la relación de cobre antes y después del tratamiento, determinando el porcentaje de remoción y la cantidad removida por cada unidad experimental. Fuente: Autores, 2016.

Este elemento se encuentra de forma natural en las aguas superficiales en concentraciones menores a un mg/L por la erosión de depósitos naturales, los organismos presentes en el agua especialmente los peces se ven afectados al utilizar el cobre como alguicida, ya que este elimina la capacidad del agua en captar oxígeno (Barrenechea Martel, 2012). En la figura 39, se evidencia el comportamiento de este parámetro en el agua tratada del sistema piloto, dando que la mejor remoción se obtuvo bajo las condiciones de 25L y 48h; la especie *C. spicatus* removió un 67,4%, la *H. psittacorum* un 77% y la combinación de estas el 71%.

Se presentan valores de remoción mayores al 60% en la primera condición evaluada con resultados menores a 1,00 mg/L que es lo establecido para este elemento cumpliendo con la resolución 0631 de 2015, lo que apunta a que esta condición es la apropiada para la remoción de este elemento. Para resaltar, la especie con mejor capacidad de absorción de cobre fue la *H. psittacorum* con porcentajes de remoción mayores al 75% bajo tres de las cuatro condiciones evaluadas, además esta especie en todas las mediciones cumplió con la normatividad obteniendo valores menores al establecido.

Se observa que para la remoción de aluminio y cobre, a diferencia de la mayoría de parámetros, no aumenta con relación al tiempo de retención.

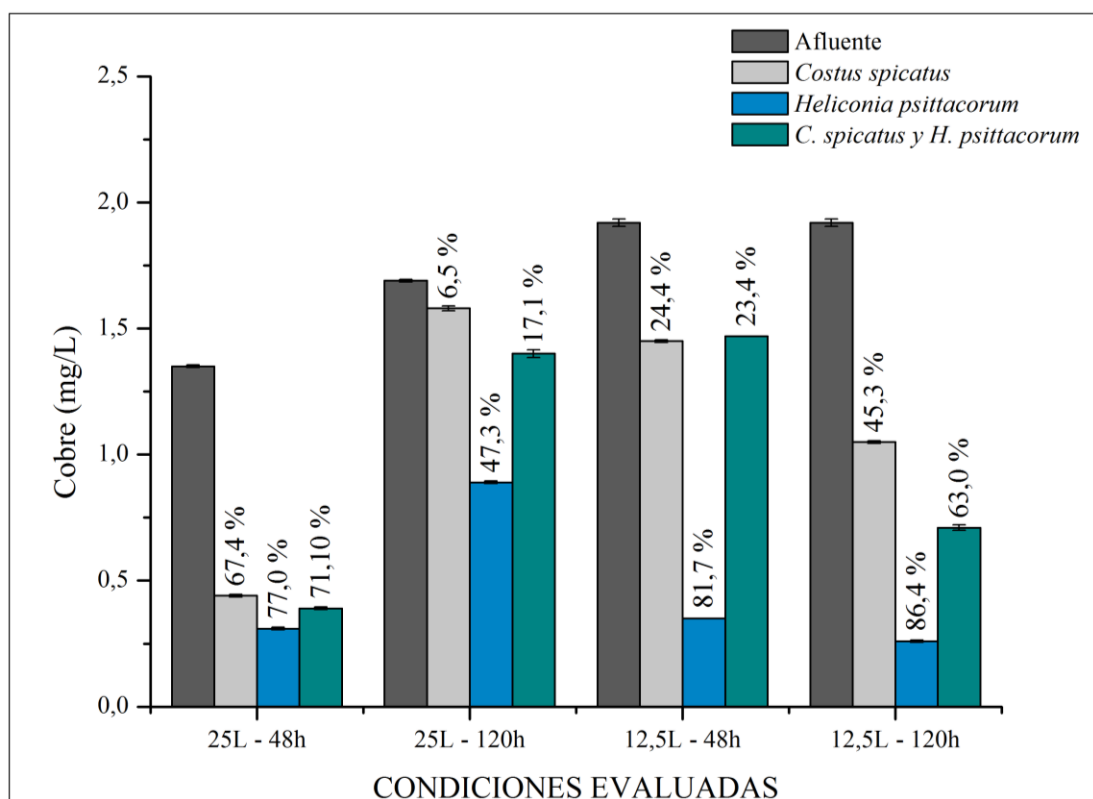


Figura 39. Resultados obtenidos para cobre bajo las condiciones evaluadas. En la gráfica se observan los porcentajes de remoción con cada una de las especies vegetales empleadas. Fuente: Autores, 2016.

Tabla 26*Resultados para hierro*

HIERRO							
Standard Methods 8008				Espectrofotómetro UV-Visible DR 6000			
Unidad: mg/L Fe				Procedimiento: 265			
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluyente (mg/L)	Valor efluente (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida (mg/L)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	1,59	1,96	-23,27	-0,37
		25	120	1,82	7,52	-313,19	-5,70
		12,5	48	1,36	6,99	-413,97	-5,63
		12,5	120	1,36	6,67	-390,44	-5,31
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	1,59	0,58	63,52	1,01
		25	120	1,82	4,28	-135,16	-2,46
		12,5	48	1,36	2,49	-83,09	-1,13
		12,5	120	1,36	1,64	-20,59	-0,28
3	<i>Costus spicatus</i> y <i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	1,59	1,59	0,00	0,00
		25	120	1,82	5,65	-210,44	-3,83
		12,5	48	1,36	5,40	-297,06	-4,04
		12,5	120	1,36	4,90	-260,29	-3,54

Nota. La tabla muestra la relación de hierro antes y después del tratamiento, determinando el porcentaje de remoción y la cantidad removida por cada unidad experimental. Fuente: Autores, 2016.

Para Espigares y Pérez (1985) el hierro es un elemento que se encuentran como elemento traza en las aguas y es necesario para la vida biológica, pero si alcanzan altas concentraciones este puede ser tóxico inhabilitando el agua para algunos usos y acumulándose en organismos y microorganismos acuáticos. Por lo que se observa en la figura 40, los valores para este parámetro en el efluente superaron los del afluyente, excepto en las condiciones 25L-48h con resultados del 63,5% para la especie *H. psittacorum* y del 0% para la combinación de las especies.

El VLMP para el hierro según la resolución 0631 de 2015 es de 1,00 mg/L. Por lo que se observa el afluente ni el efluente cumplen con lo establecido en la normatividad, ya que sobrepasan los valores permitidos para los vertimientos. El aumento de este elemento en el efluente, se debe al sustrato utilizado, por lo que se realiza un análisis de los mismos y se consignan los resultados obtenidos en la tabla 27.

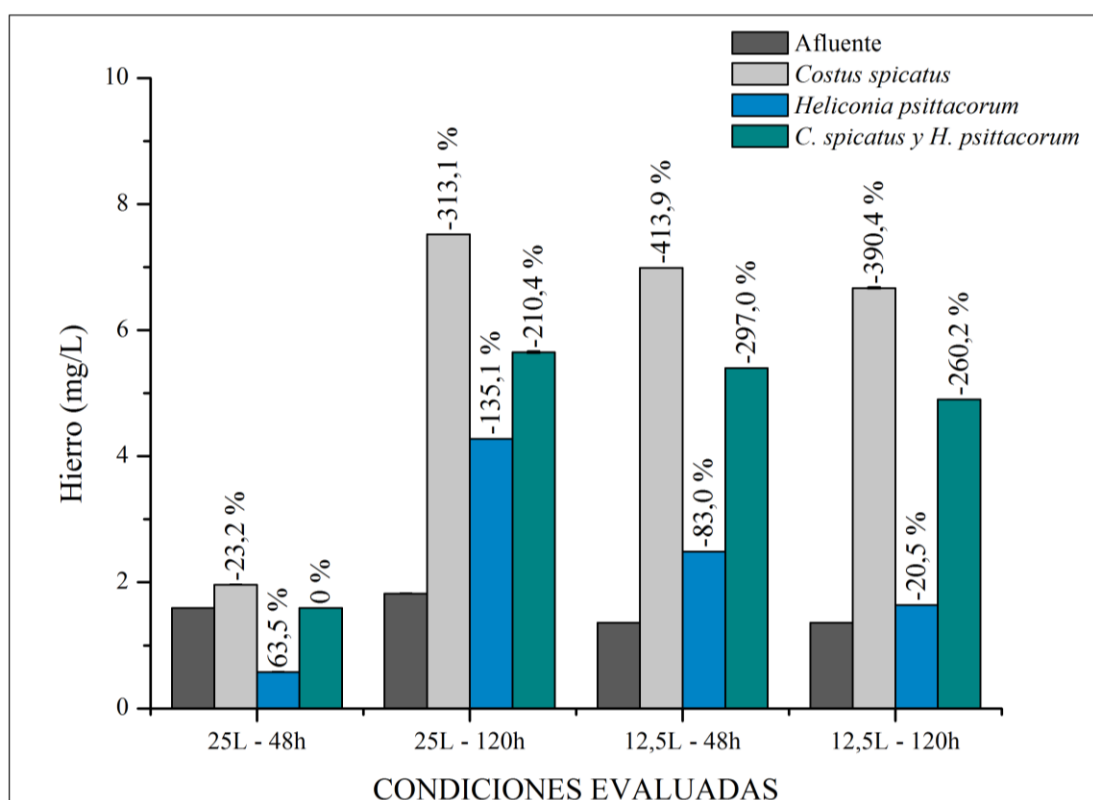


Figura 40. Resultados obtenidos para hierro bajo las condiciones evaluadas. En la gráfica se observan los porcentajes de remoción con cada una de las especies vegetales empleadas. Fuente: Autores, 2016.

Los sustratos usados fueron grava gruesa, granito #3 y arena gruesa, se evaluó con el fin de conocer si alguno de estos materiales aportaban alguna sustancia orgánica o inorgánica al agua durante su contacto en el tiempo de retención estipulado. Los resultados mostraron un aporte significativo en el efluente de hierro y dureza total, para los demás parámetros no se observó ningún aumento durante el tiempo de retención en las unidades experimentales.

Para que este análisis guarde relación y sea acorde con el sistema piloto, se reproducen las condiciones en el laboratorio: tiempo de retención (48 y 120 horas), volumen de agua de 500 mL y las cantidades de sustratos proporcionales a las usadas para simular las condiciones reales, empleando para grava gruesa: 533,3 g; granito #3: 533,3g y arena gruesa: 1066,6 g. Se analizó los sustratos para conocer su aporte individual y en conjunto.

Tabla 27*Resultados para hierro en los sustratos*

HIERRO						
Standard Methods 8008 Unidad: mg/L Fe			Espectrofotómetro UV-Visible DR600 Procedimiento: 265			
Sustratos utilizados	Variables		Evaluación		Resultados	
	Volumen (mL)	Tiempo (Horas)	Blanco (mg/L)	Muestra (mg/L)	Porcentaje de incremento (%)	Carga aportada (mg/L)
Arena	500	48	0,1	3,11	3010	3,01
Gruesa	500	120	0,1	8,12	8020	8,02
Granito #3	500	48	0,1	0,40	300	0,30
	500	120	0,1	0,59	490	0,49
Grava gruesa	500	48	0,1	0,37	270	0,27
	500	120	0,1	0,45	350	0,35
Medio filtrante	500	48	0,1	4,35	4250	4,25
combinado	500	48	0,1	9,27	9170	9,17

Nota: En la tabla se muestran los resultados obtenidos para el hierro en la matriz de suelo para conocer el aporte de este parámetro en el sistema piloto.

Según la tabla anterior, se puede deducir que se presenta un aporte significativo de hierro por parte de la arena gruesa, que en un tiempo de 120 horas paso de 0,1 mg/L a 8,12 mg/L de hierro, incrementando un 8020%. La arena gruesa se compone en ocasiones de hierro, feldespato e incluso yeso. Cabe resaltar que el incremento de hierro en el medio

filtrante combinado, se debe a la sumatoria de los aportes de cada material y aunque sean en menores cantidades que la arena gruesa, que es el principal contribuyente, fue contraproducente para el resultado obtenido. En la figura 41 se observa el comportamiento de este parámetro en el análisis realizado en laboratorio.

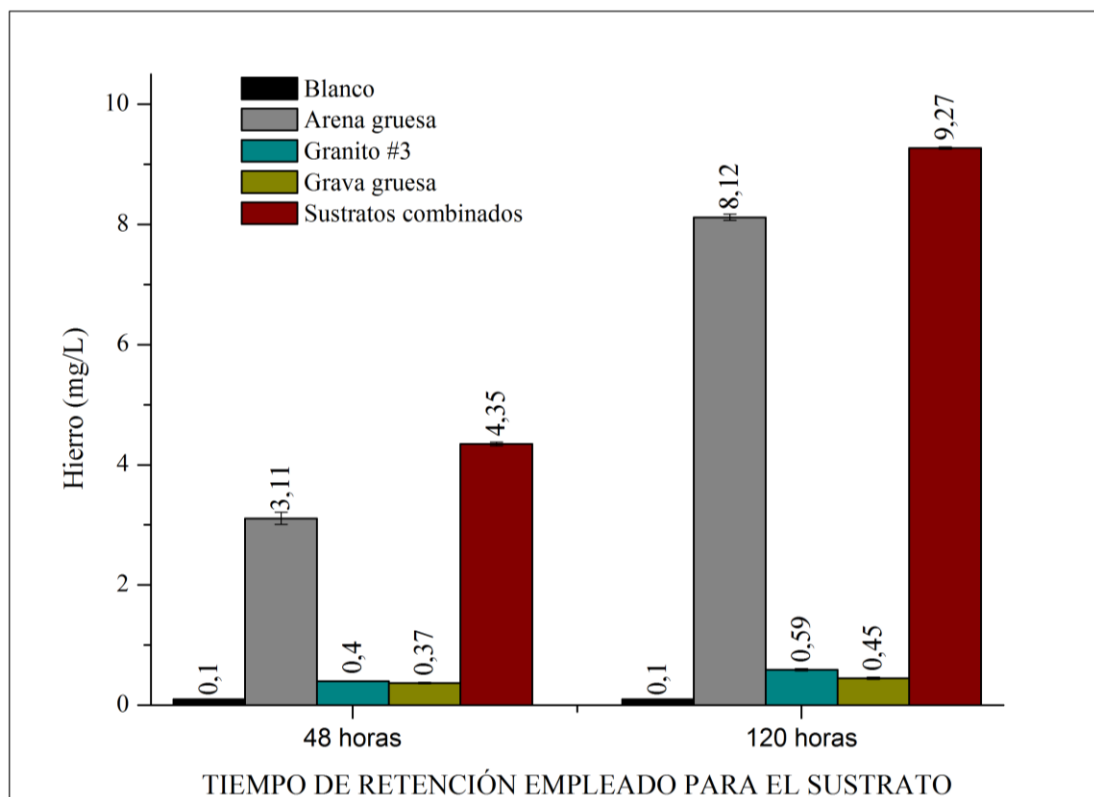


Figura 41. Aporte de hierro por cada sustrato en los volúmenes trabajados. Fuente: Autores, 2016.

Para el grupo de parámetros generales del agua residual como color real, conductividad, alcalinidad y dureza se presenta los resultados en las tablas 28, 29, 30 y 31 respectivamente.

Tabla 28*Resultados para color real*

COLOR REAL							
Standard Methods 8025 Unidad: UPtCo				Espectrofotómetro UV-Visible DR6000 Procedimiento: 120			
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluyente (mg/L)	Valor efluente (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida (mg/L)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	317,3	238,3	24,90	79,00
		25	120	441,0	260,0	41,04	181,00
		12,5	48	459,3	86,6	81,15	372,70
		12,5	120	459,3	40,3	91,23	419,00
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	317,3	205,6	35,20	111,70
		25	120	441,0	161,6	63,36	279,40
		12,5	48	459,3	71,6	84,41	387,70
		12,5	120	459,3	36,3	92,10	423,00
3	<i>Costus spicatus</i> y <i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	317,3	215,0	32,24	102,30
		25	120	441	194,3	55,94	246,70
		12,5	48	459,3	78,0	83,02	381,30
		12,5	120	459,3	38,0	91,73	421,30

Nota. La tabla muestra la relación de color real antes y después del tratamiento, determinando el porcentaje de remoción y la cantidad removida por cada unidad experimental. Fuente: Autores, 2016.

El color en aguas residuales es causado por los sólidos en suspensión, material coloidal y sustancias en solución según Crites y Tchobanoglous (2000). Barrenechea Martel (2012) coincide afirmando que este parametro puede estar ligado con la turbidez, los solidos suspendidos y sedimentables del agua guardando concordancia con los resultados obtenidos para estos parametros.

Lo que muestra la figura 42 son los resultados obtenidos del color, logrando los mejores resultados en la condicion de 12,5L-120h para la *C. spicatus* con 91,2%, la H.

psittacorum con 92,1% y la combianción de las especies con 91,7%, en general se alcanzó un excelente resultado en la remocion del color real.

Aunque las unidades de color presentes en un agua residual es importante porque determina indirectamente los niveles de contaminación por partículas en suspensión o material orgánico, no tiene un VLMP en la resolución 0631 de 2015, en la cual sugiere un análisis y reporte de este parámetro.

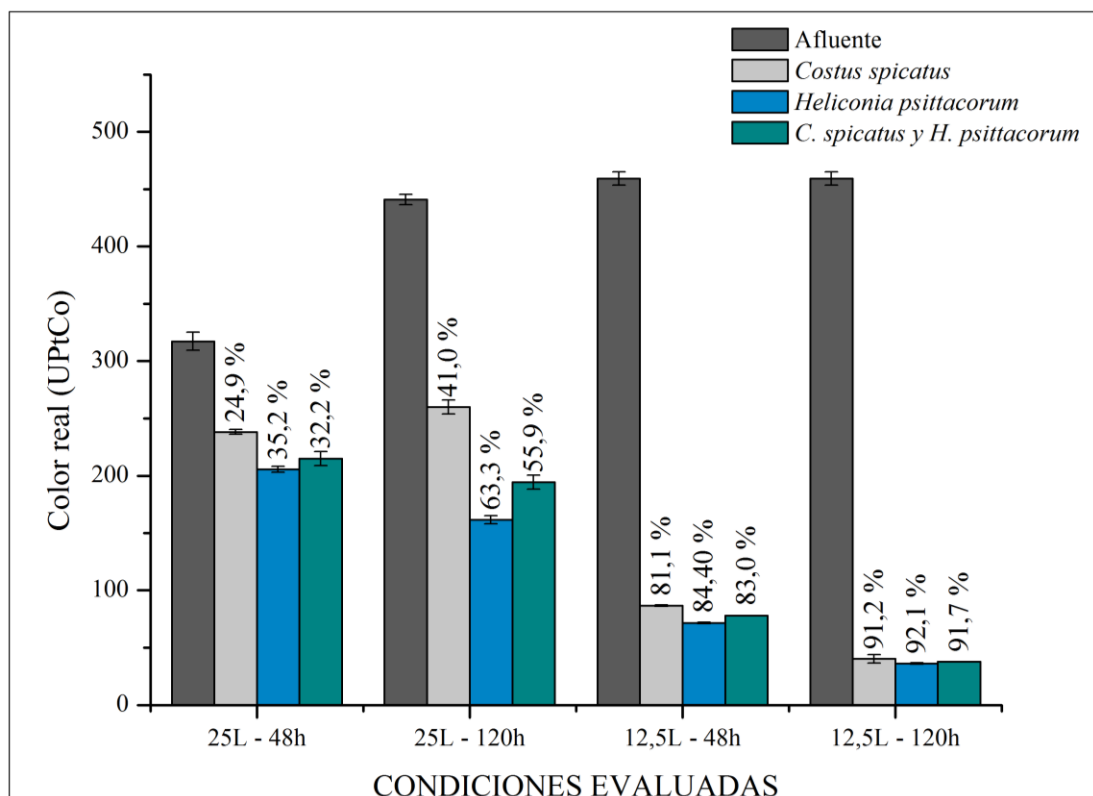


Figura 42. Resultados obtenidos para color real bajo las condiciones evaluadas. En la gráfica se observan los porcentajes de remoción con cada una de las especies vegetales empleadas. Fuente: Autores, 2016.

La conductividad es la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica, y es una medida indirecta de la cantidad de iones en solución (fundamentalmente cloruro, nitrato, sulfato, fosfato, sodio, magnesio y calcio) (Goyenola, 2007), en la mayoría de las soluciones acuosas, entre mayor sea la cantidad de sales disueltas, mayor será la conductividad. Aguas que corren en sustratos graníticos tienden a tener menor

conductividad, ya que ese sustrato está compuesto por materiales que no se ionizan. En la tabla 29 se presentan los resultados en la remoción de este parámetro.

Tabla 29

Resultados para conductividad

CONDUCTIVIDAD							
Standard Methods 2510 B / Conductimétrico				Conductímetro HANNA 8733			
Unidad: $\mu\text{S}/\text{cm}$							
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluyente ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Valor efluente ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	1,156	0,866	25,09	0,29
		25	120	1,123	1,073	4,45	0,05
		12,5	48	1,143	0,990	13,39	0,15
		12,5	120	1,143	1,002	12,34	0,14
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	1,156	0,770	33,39	0,39
		25	120	1,123	0,993	11,58	0,13
		12,5	48	1,143	0,760	33,51	0,38
		12,5	120	1,143	0,822	28,08	0,32
3	<i>Costus spicatus</i> y <i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	1,156	0,816	29,41	0,34
		25	120	1,123	1,026	8,64	0,10
		12,5	48	1,143	0,820	28,26	0,32
		12,5	120	1,143	0,875	23,45	0,27

Nota. La tabla muestra la relación de conductividad antes y después del tratamiento, determinando el porcentaje de remoción y la cantidad removida por cada unidad experimental. Fuente: Autores, 2016.

El mejor resultado mostrado para este parámetro según la figura 43 es en las condiciones evaluadas bajo el volumen de 25L y tiempo de 48h, donde se presenta un afluyente de 1,156 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y las especies *C. spicatus*, *H. psittacorum* y la unidad experimental con ambas especies mostraron una remoción de 25,0%, 33,3% y 29,4%

respectivamente, los segundos mejores resultados son obtenidos en las condiciones de 12,5L y 48h, con resultados muy cercanos a los de la primera medición a excepción de la *C. spicatus* que redujo su porcentaje de remoción a un 13,3%. Por lo que se puede observar que la remoción de este parámetro tiene mejores resultados en tiempo de retenciones menores.

La conductividad tampoco incrementa significativamente con el resultado de este tratamiento, durante el tiempo de experimentación. Este dato es significativo, con el fin de determinar si el sistema puede ser apto para reutilizar sus efluentes en riego agrícola, sin incrementar el aporte de sales por agua aplicada (Lahora Cano, 2002).

Este parámetro no está especificado en la resolución 0631 de 2015 y no se determina el cumplimiento o infracción de los niveles de conductividad presentes en el afluente y efluente.

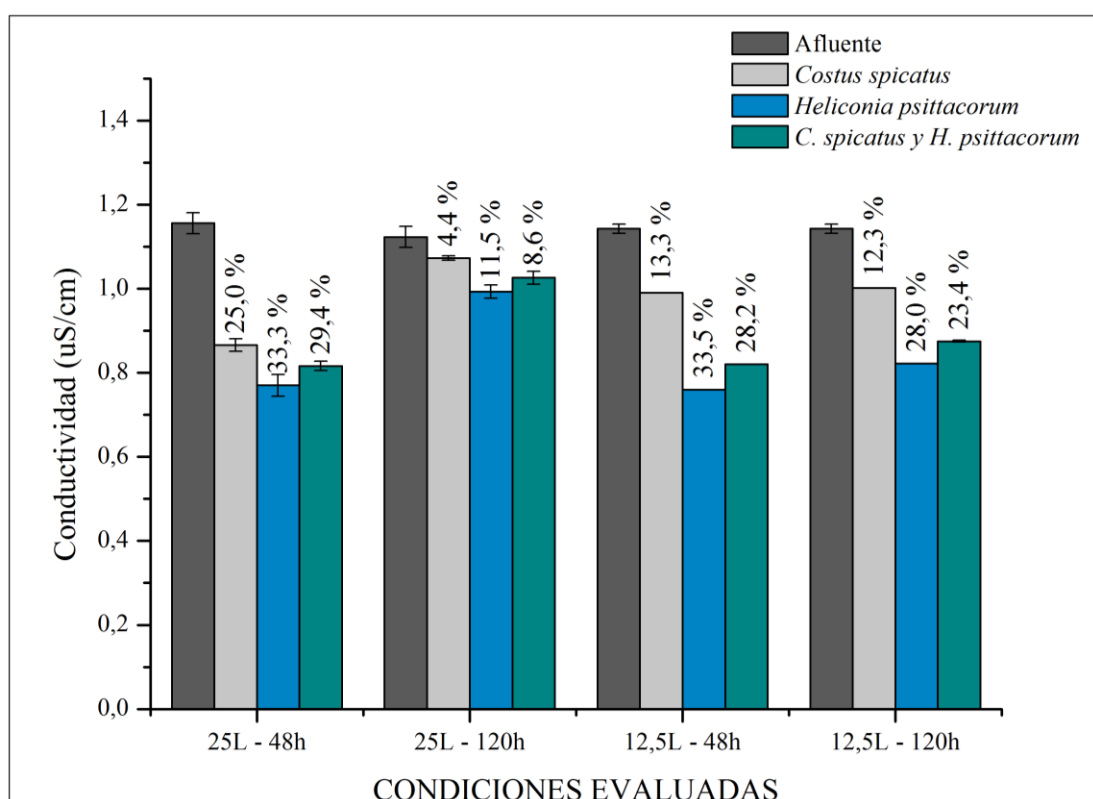


Figura 43. Resultados obtenidos para conductividad bajo las condiciones evaluadas. En la gráfica se observan los porcentajes de remoción con cada una de las especies vegetales empleadas. Fuente: Autores, 2016.

La alcalinidad es la capacidad del agua de neutralizar acidez (Díaz Franky, 2014). Sin embargo aniones de ácidos débiles como bicarbonatos, sulfuros, carbonatos entre otros pueden contribuir con la alcalinidad según afirma Barrenechea Martel (2012). A continuación la tabla 30 muestra los resultados para este parámetro.

Tabla 30

Resultados para alcalinidad

ALCALINIDAD							
Standard Methods 2320 B / Titulométrico							
Unidad: mg/L de CaCO ₃							
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluyente (mg/L)	Valor efluente (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida (mg/L)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	511,6	490,0	4,22	21,60
		25	120	545,0	515,0	5,50	30,00
		12,5	48	538,3	515,0	4,33	23,30
		12,5	120	538,3	420,0	21,98	118,30
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	511,6	485,0	5,20	26,60
		25	120	545,0	448,3	17,74	96,70
		12,5	48	538,3	415,0	22,91	123,30
		12,5	120	538,3	390,0	27,55	148,30
3	<i>Costus spicatus</i> y	25	48	511,6	490,0	4,22	21,60
		25	120	545,0	475,0	12,84	70,00
	<i>Heliconia psittacorum</i>	12,5	48	538,3	510,0	5,26	28,30
		12,5	120	538,3	478,3	11,15	60,00

Nota. La tabla muestra la relación de alcalinidad antes y después del tratamiento, determinando el porcentaje de remoción y la cantidad removida por cada unidad experimental. Fuente: Autores, 2016.

Como se observa en la figura 44, los niveles de alcalinidad en los afluentes son altos, quizá con relación a los también elevados niveles de dureza como se muestra en la tabla

31. Como se puede demostrar, la remoción de este parámetro es relativamente bajo; siendo así, los mejores resultados fueron obtenidos con las condiciones evaluadas propuestas en la última medición (12,5L- 120h), dando para la especie *C. spicatus* una remoción del 21,9%, para la *H. psittacorum* un 27,5% y para la unidad experimental que contiene ambas especies un 11,1%.

No se tiene un rango específico para determinar si el tratamiento cumple con la resolución 0631, ya que este valor es de análisis y reporte.

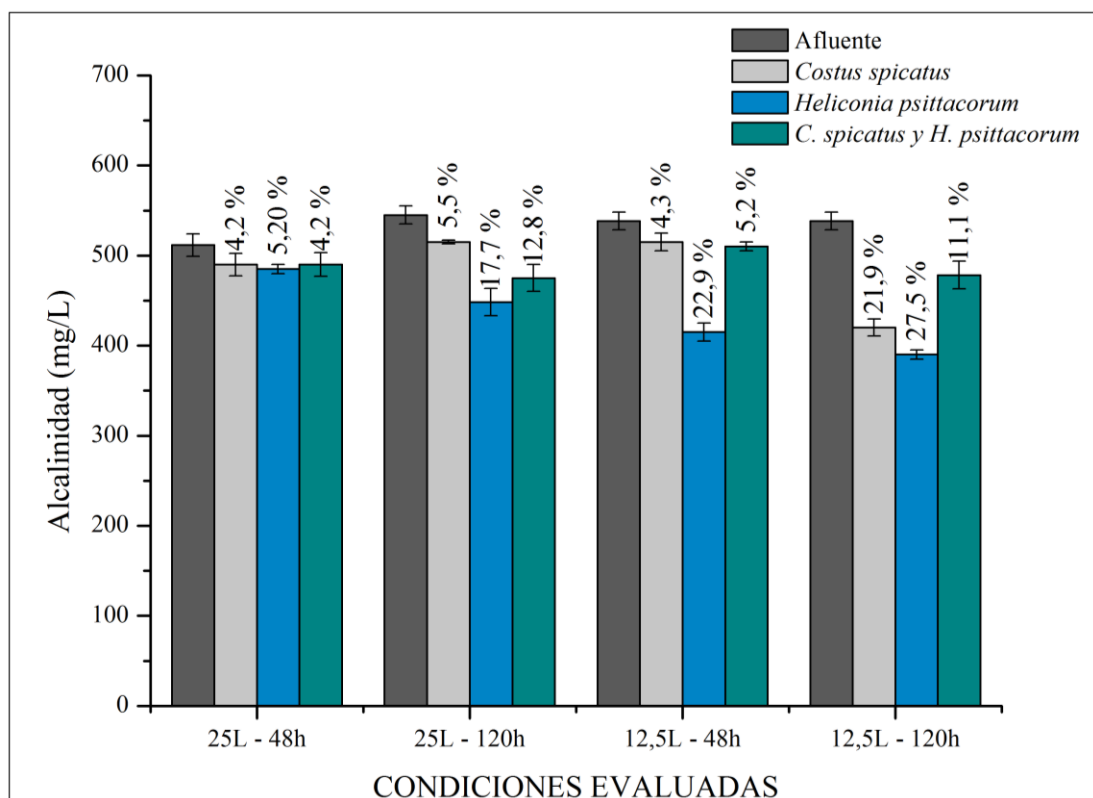


Figura 44. Resultados obtenidos para alcalinidad bajo las condiciones evaluadas. En la gráfica se observan los porcentajes de remoción con cada una de las especies vegetales empleadas. Fuente: Autores, 2016.

La dureza se entiende en el agua como el contenido de metales alcalinotérreos, especialmente Calcio y Magnesio (UNAD, 2008). Está relacionada con el pH y la alcalinidad. Los resultados observados en la tabla 31, indican unidades equivalentes de CaCO_3 mayores a 500 demostrando que son aguas muy duras aun después de ser tratadas en el sistema piloto.

Tabla 31*Resultados para dureza total*

DUREZA TOTAL					
Standard Methods 2340 C / Titulométrico con EDTA					
Unidad: mg/L de CaCO ₃					
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluente (mg/L)	Valor efluente (mg/L)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	>500	>500
		25	120	>500	>500
		12,5	48	>500	>500
		12,5	120	>500	>500
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	>500	>500
		25	120	>500	>500
		12,5	48	>500	>500
		12,5	120	>500	>500
3	<i>Costus spicatus</i> y <i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	>500	>500
		25	120	>500	>500
		12,5	48	>500	>500
		12,5	120	>500	>500

Nota. La tabla muestra la relación de dureza total antes y después del tratamiento. Fuente: Autores, 2016.

Para la remoción de la dureza se sugiere un procedimiento conocido como el ablandamiento cal-soda o a través de la precipitación con cal.

No se tiene un valor establecido de las cantidades de dureza permitidas en los vertimientos, ya que este parámetro es de análisis y reporte en la resolución 0631 de 2015. Se determina que las altas concentraciones de este parámetro en el afluente están relacionadas con el alto uso de detergentes usados para la limpieza en la UFPSO, por otra parte se corrobora que el aumento de este parámetro en el efluente se debe al sustrato utilizado, los resultados de los análisis realizados al sustrato se muestran en la tabla 32.

Tabla 32*Resultados para dureza total en los sustratos*

DUREZA TOTAL						
Método: Titulométrico con EDTA						
Unidad: mg/L de CaCO ₃						
Sustratos utilizados	Variables		Evaluación		Resultados	
	Volumen (mL)	Tiempo (Horas)	Blanco (mg/L)	Muestra (mg/L)	Porcentaje incremento (%)	Carga aportada (mg/L)
Arena Gruesa	500	48	0,1	17,3	17200	17,20
	500	120	0,1	30	29900	29,90
Granito #3	500	48	0,1	112,3	112200	112,20
	500	120	0,1	551,6	551500	551,50
Grava gruesa	500	48	0,1	12,7	12600	12,60
	500	120	0,1	34	33900	33,90
Medio filtrante combinado	500	48	0,1	143,8	143700	143,70
	500	48	0,1	583,4	583300	583,3

Nota: En la tabla se muestran los resultados obtenidos para la dureza total en la matriz de suelo para conocer el aporte de este parámetro en el sistema piloto.

Como se puede observar en la figura 45 el aporte de dureza lo presenta el granito #3 incrementando de 0,1 a 551,6 mg/L de CaCO₃ en 120 horas, debido a que el granito es una roca ígnea formada por tres minerales: cuarzo, feldespato y mica, esta última se compone de silicatos de alúmina, hierro, calcio, magnesio y minerales alcalinos. En nuestro caso, la forma de incorporarse o transferirse al agua, es a través de la fricción, ya que al tener un contacto con la roca se desprenden sus minerales especialmente calcio y magnesio que son los principales constituyentes de la dureza.

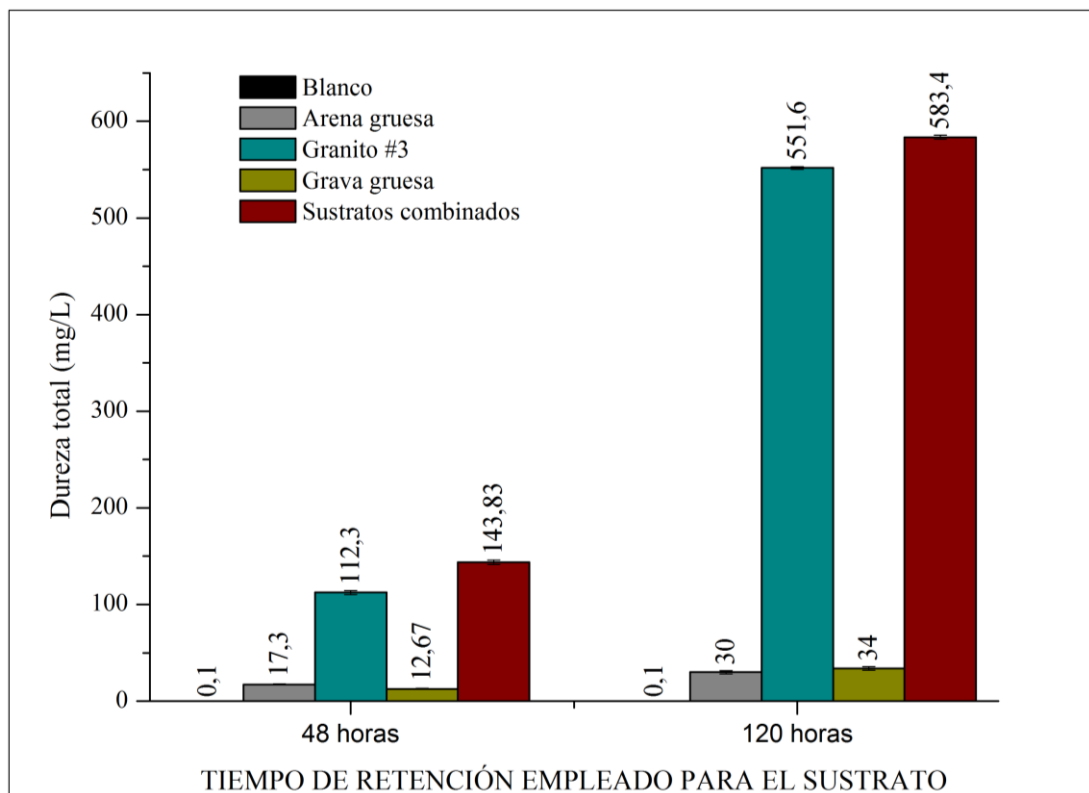


Figura 45. Aporte de dureza total por cada sustrato en los volúmenes trabajados. Fuente: Autores, 2016.

Los coliformes totales son un conjunto de especies bacterianas que son de gran importancia como indicadores de contaminación del agua y los alimentos (Carrion, 2008). Algunos trabajos demuestran una remoción del 89 al 98% empleando humedales artificiales con periodos de retenciones mayores a 6 días. Como se observan en las tablas 33 y 34 de los parámetros coliformes totales y E. Coli respectivamente, muestran cantidades mayores a 1100 NMP/100mL tanto en el afluente como en el efluente.

Tabla 33*Resultados para coliformes totales*

COLIFORMES TOTALES					
Método: Número más probable, sustrato definido.					
Unidad: NMP/100mL					
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluente (NMP/100mL)	Valor efluente (NMP/100mL)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	>1100	>1100
		25	120	>1100	>1100
		12,5	48	>1100	>1100
		12,5	120	>1100	>1100
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	>1100	>1100
		25	120	>1100	>1100
		12,5	48	>1100	>1100
		12,5	120	>1100	>1100
3	<i>Costus spicatus</i> y <i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	>1100	>1100
		25	120	>1100	>1100
		12,5	48	>1100	>1100
		12,5	120	>1100	>1100

Nota. La tabla muestra la relación de coliformes totales antes y después del tratamiento.
Fuente: Autores, 2016.

La bacteria *Escherichia Coli*, y el grupo coliforme en su conjunto, son los organismos más comunes utilizados como indicadores de la contaminación fecal. Las bacterias coliformes son microorganismos de forma cilíndrica, capaces de fermentar la glucosa y la lactosa (Romero J. A., 2002).

Tabla 34*Resultados para Escherichia Coli*

ESCHERICHIA COLI					
Método: Número más probable, sustrato definido.					
Unidad: NMP/100mL					
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluente (NMP/100mL)	Valor efluente (NMP/100mL)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	>1100	>1100
		25	120	>1100	>1100
		12,5	48	>1100	>1100
		12,5	120	>1100	>1100
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	>1100	>1100
		25	120	>1100	>1100
		12,5	48	>1100	>1100
		12,5	120	>1100	>1100
3	<i>Costus spicatus</i> y <i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	>1100	>1100
		25	120	>1100	>1100
		12,5	48	>1100	>1100
		12,5	120	>1100	>1100

Nota. La tabla muestra la relación de Escherichia Coli antes y después del tratamiento.

Fuente: Autores, 2016.

Vale la pena resaltar, que para las últimas mediciones hubo un cambio en el color de las muestras evaluadas mediante el método fluorocult pasando de un verde oscuro a amarillo, como se observa en el apéndice B en la sección de análisis de laboratorio; sugiriendo una posible disminución de las colonias, pero debido al método empleado no es posible determinar su remoción.

4.4 Respuesta fisiológica de las especies vegetales

Durante el funcionamiento del sistema piloto se realiza un seguimiento a tres individuos de cada unidad experimental comparándolos con un patrón de referencia, el cual no está plantado en el humedal sino en condiciones del ambiente local. De esta manera se observa el comportamiento de cada individuo frente a las condiciones trabajadas (agua residual, sustrato, densidad de siembra, radiación solar, etc.)

Las dos especies nativas mostraron adaptabilidad y tolerancia al agua residual. Aparte de esto, ningún individuo murió dentro de las unidades experimentales al ser sometidas a las condiciones de estrés por las altas cargas contaminantes de los vertimientos, mostrando su alta resistencia. Dentro de estas condiciones, las dos especies no se inhibieron en su crecimiento ni se presenció detrimento fisiológico, por el contrario se propagaron rápidamente, germinando nuevos brotes completamente sanos y con crecimiento rápido; en el caso de la *H. psittacorum* los individuos adultos mostraron nuevas inflorescencias y drupas maduras. Las figuras 46 y 47 muestran el seguimiento en el crecimiento y propagación de individuos de ambas especies.

Tanto la *H. psittacorum* como la *C. spicatus* dieron resultados positivos, mostrándose como macrófitas nativas que pueden emplearse para estos sistemas en el tratamiento de las aguas domésticas e industriales ya sea a nivel local, regional o global. Se recomienda investigar más sobre la *C. spicatus* con fines de biorremediación debido al potencial presentado por la especie; por otra parte, el estudio realizado por Aulestia (2012) determinó la tolerancia de la *H. psittacorum* a la carga contaminante de lixiviados del relleno sanitario de presidente en Buga.



Figura 46. Evolución de un brote de la especie *C. spicatus* en la unidad experimental 1. Autores, 2016.



Figura 47. Germinación, adaptación y maduración de la *H. psittacorum*. Autores, 2016.

Estas especies además de tolerar y sobrevivir las condiciones de estrés por el agua residual, también podrían tener un potencial fitorremediador para la matriz suelo, por lo

cual se recomienda investigar con estas especies en el tratamiento de suelos contaminados como proponen Muñoz, Nevárez, Ballinas y Peralta (2010).

El uso de estas macrófitas en depuración de aguas residuales tiene beneficios adicionales como la creación de ecosistemas para la microfauna, además al ser un humedal subsuperficial mitiga los olores ofensivos y controla la presencia de vectores (Halverson, 2004; Tchobanoglous, Crites, Gearheart, & Reed, 2003; Cerón & Rojas, 1995).

Por otra parte estas aguas residuales tratadas pueden aprovecharse para usos posteriores como el riego de jardines, de especies ornamentales e incluso en agricultura según Silva, Torres y Madera (2008).

4.5 Socialización del proyecto a estudiantes de la UFPSO

La construcción del sistema piloto también se usó como ayuda pedagógica para el fortalecimiento académico de los estudiantes de la UFPSO, sirviendo como espacio de charlas y socializaciones en las materias de contaminación ambiental, química ambiental, tecnologías limpias y gestión de residuos líquidos, entre otras. Para estos casos se elaboró un folleto informativo acerca del proyecto el cual se observa en el apéndice D.



Figura 48. Socialización del proyecto a estudiantes de la UFPSO. Fuente: Autores, 2016.

Capítulo 5: Conclusiones

Los humedales artificiales se postulan como una tecnología alternativa y efectiva dado su potencial de descontaminación en aguas residuales. Además, es técnicamente ejecutable, económicamente atractiva, socialmente aceptada y ambientalmente sostenible.

Esta tecnología es bastante implementada en Europa, mientras que en Colombia es poco conocida y aplicada. Tanto la *H. psittacorum* como la *C. spicatus* dieron resultados positivos, mostrándose como macrófitas nativas que pueden emplearse para el tratamiento de las aguas residuales generadas en la UFPSO y replicarse a nivel regional y/o global; siendo una opción viable en zonas rurales apartadas y de bajos recursos donde carecen de sistemas para el tratamiento de sus aguas residuales.

Otra ventaja es que el personal para su mantenimiento es mínimo, la implementación y los costos operativos son bajos, así mismo estas aguas residuales después de ser tratadas pueden reusarse con múltiples fines como el riego para plantas ornamentales, en jardines e incluso en la agricultura, ya que se disminuyen notablemente los sólidos y la materia orgánica, el pH se mantiene estable, no aporta sales y los remanentes de fósforo y nitrógeno ayudan como fertilizantes agrícolas.

Gracias a que el humedal artificial es de tipo subsuperficial, se presentaron ventajas como el control de vectores y la mitigación de olores ofensivos, igualmente mejoró las propiedades organolépticas del agua residual disminuyendo la turbidez y el color del agua; por otra parte, la inflorescencia de las macrófitas aumenta el valor paisajístico creando a su vez hábitats para la microfauna.

Las especies vegetales seleccionadas al ser nativas y estar adaptadas al clima y condiciones generales de la zona facilitó la sobrevivencia de las macrófitas. Las dos especies mostraron adaptabilidad, tolerancia y resistencia a las altas concentraciones del agua residual mostrando un desarrollo normal en su fisionomía. Regularmente se presentaron los porcentajes de remoción más altos para la *H. psittacorum* y los menores para la *C. spicatus*, quedando en medio de ambos valores los resultados de la unidad

experimental combinada. Sin embargo los resultados por la *C. spicatus* son sobresalientes teniendo en cuenta que no ha sido usada anteriormente para este fin.

En general, los mejores resultados se presentaron bajo las condiciones de 12,5L, demostrando que al aumentar el volumen la remoción disminuye, lo cual indica que un volumen aún mayor podría saturar al humedal con el contaminante. Por lo cual se recomienda trabajar a escala real con un volumen proporcional de 12,5L por cada 0,1m³ de humedal artificial, lo que concuerda con bibliografía encontrada de 135L por cada 1m³.

La mayoría de autores en sus estudios evaluaron solamente los parámetros básicos (DBO₅, DQO, SST) en afluentes pretratados, diluidos o con bajas cargas contaminantes. En nuestro caso a pesar de trabajar con cargas contaminantes más altas se obtuvieron óptimos resultados en más de 20 parámetros analizados.

Sin embargo, el éxito del tratamiento en el humedal depende de su diseño, de las macrófitas empleadas, la carga contaminante, el medio filtrante, el tiempo de retención, el volumen de agua tratado, las condiciones climáticas de la zona, entre otras características.

El sistema piloto tuvo excelentes remociones de materia orgánica en términos de DBO₅ y DQO con remociones superiores al 80% al aumentar el tiempo de retención. Para la reducción de estos parámetros influyen las especies vegetales principalmente por la asimilación de nutrientes, degradación microbiana y por su aporte de oxígeno en la zona radicular. Se presentaron los mejores resultados para la unidad experimental dos (UE₂) correspondiente a la *H. psittacorum*.

Este sistema presentó altas remociones en cuanto a sólidos suspendidos y sedimentables gracias a que existe espacio para la precipitación de sólidos, filtración por el sustrato y degradación por las especies vegetales donde influyó el tiempo de retención para llevarse a cabo los procesos biológicos. Los SST tuvieron remociones >90%, en cuanto a los SSED se alcanzó en algunos casos el 100%. Los resultados fueron semejantes en las tres unidades experimentales.

Para grasas y aceites no se presentaron remociones significativas debido a las altas concentraciones del afluente producto de los vertimientos de las cafeterías y del restaurante

institucional. Por otra parte, los compuestos de fósforo requieren tiempos de retención más largos, y así poder evitar eutrofización en los cuerpos receptores. Los principales mecanismos para su remoción fueron la sedimentación, adsorción y la asimilación vegetal, aunque también pudo presentarse precipitación química por la arena rica en hierro.

Las macrófitas al transportar oxígeno a las zonas más profundas proporcionan zonas aerobias y anóxicas lo que estimula la remoción de compuestos de nitrógeno mediante el proceso de amonificación, seguido por nitrificación, desnitrificación y posterior pérdida de gas a la atmósfera; otra cantidad menor es captada por la planta.

Para nitritos y nitratos se dan mejores resultados con menor cantidad del agua residual y con un mayor tiempo de retención, mientras que la influencia de estas variables no es tan determinante para el N amoniacal con remociones >60% y el N total >80%, bajo todas las condiciones evaluadas. En cuanto a las especies vegetales la *H. psittacorum* tuvo mejores resultados (>80%), probablemente por mayor translocación de oxígeno a la rizósfera o por su asimilación incorporando a los tejidos vegetales compuestos orgánicos de nitrógeno.

Los fluoruros se removieron en una cantidad mayor al 70% bajo todas las condiciones evaluadas, alcanzando remociones para la *C. spicatus* de 88,4%, para la *H. psittacorum* de 89,8% y para la combinación de las especies de 86,2%, bajo la condición de 12,5L y 120h. En cambio, para el ion sulfato hubo remociones inconstantes tendiendo a ser bajas, a excepción de la condición de 25L y 120h, dando para la *C. spicatus* un 74,8% para la *H. psittacorum* 80,7% y la unidad experimental con ambas especies 77,5%.

El aluminio se removió principalmente por fijación al sedimento y adsorción por las plantas, sin necesidad de pasar un mayor tiempo de retención. Para el cobre la mejor remoción se obtuvo a 25L y 48h, la especie con más capacidad de absorción de cobre fue la *H. psittacorum* con porcentajes de remoción mayores al 75% bajo tres de las cuatro condiciones evaluadas. Esto significa que para la remoción de metales, a diferencia de la mayoría de parámetros, no aumenta con relación al tiempo de retención.

Para el hierro y la dureza total, se presentó un incremento en las concentraciones después de haber pasado por el tratamiento en el sistema piloto. Se determinó que la arena

gruesa aporta hierro, mientras que el granito #3 debido a su composición, contribuye con calcio y magnesio lo que aumenta la dureza del agua.

Para los demás parámetros generales como el color, hubo remociones mayores al 90% en el caso de 25L y 120h. Mientras que en la conductividad los mejores resultados se dieron en tiempos menores, sin embargo en ninguno de los casos se aporta sales permitiendo su posterior uso en riego de unidades verdes. En la alcalinidad se encontraron bajas remociones dentro del rango de 4,2% y 27,5%.

En las últimas mediciones coliformes totales y E. Coli hubo un cambio en el color de las muestras evaluadas mediante el método fluorocult pasando de un verde oscuro a amarillo claro, como se observa en el apéndice B en la sección de análisis de laboratorio; sugiriendo una posible disminución de las colonias, pero debido al método empleado no es posible determinar su remoción.

Por último se considera que la nueva normativa no es rigurosa en la exigencia y control de algunos parámetros como los compuestos de nitrógeno, fósforo, algunos metales y otros parámetros generales.

Capítulo 6: Recomendaciones

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos durante el desarrollo de este trabajo, se hacen las siguientes recomendaciones para que ayuden a fortalecer investigaciones futuras.

Se sugiere el uso de humedales construidos como un sistema de tratamiento secundario, donde se asegure que las aguas residuales a tratar se les disminuyan la carga contaminante, ya que la eficiencia del sistema es mayor si el agua residual posee menor carga orgánica o ha sido pretratada.

Se recomienda análisis previos al medio filtrante a utilizar, para asegurar que sea totalmente inerte o que la composición de los mismos no aporte sustancias que puedan alterar los resultados en el tratamiento. A su vez, es importante tener una unidad de tratamiento sin sembrar que sirva como medio de control, y así tener una perspectiva del papel que juegan las plantas en la remoción de los contaminantes.

Basados en los resultados se recomienda que los tiempos de retención trabajados sean periodos largos (>2 días), que aseguren mayor remoción en la carga contaminante y la adsorción, asimilación o sedimentación de sustancias inorgánicas.

Las condiciones climáticas para cada región son diferentes, por tal razón es necesario conocer la zona de vida en la que se encuentra, facilitando el reconocimiento de las especies vegetales a trabajar como su producción de biomasa, tasas de crecimiento y su comportamiento en temporadas de sequía o humedad.

Para los parámetros que se realizan ex situ, es necesaria una correcta conservación de las muestras que asegure la integridad de las mismas y no ocurran alteraciones en su composición que puedan intervenir en el análisis.

Si se desea evaluar la eficiencia de remoción de fósforo con especies en la fase de crecimiento a través de humedales subsuperficiales, es recomendable iniciar los análisis dos meses después de que se siembren las plantas, para comprobar si en esta fase la remoción de fósforo es mayor que en otra.

Si se desea la reutilización de las aguas tratadas en humedales artificiales, es necesaria una desinfección adicional que no exponga algún peligro para su utilización en el riego de algunos cultivos como plantas ornamentales o elementos estéticos como fuentes o lagunas.

La especie *Costus spicatus* sobrevivió a las condiciones de estrés brindadas por el agua residual y removió efectivamente algunos contaminantes, por tal razón, se recomienda extender la investigación sobre esta especie para la descontaminación de la matriz suelo. Por otra parte se recomienda estudiar sobre la translocación de los elementos removidos por las especies vegetales trabajadas, para conocer a fondo la zona en donde se bioacumula y sus mecanismos de fitorremediación.

Bibliografía

- ACEMSA. (2010). *Aguas de Ceuta empresa municipal S.A.* Recuperado el 10 de 2015, de <http://www.acemsa.es/>: <http://www.acemsa.es/index.php/red-de-saneamiento/un-poco-de-historia>
- Ajithabai, M. D., Sreedevi, S., Jayakumar, G., Nair, M. S., Deepa, P. N., & Rani, S. S. (2011). *Phytochemical analysis radical scavenging activity of the extracts of Costus picatus Linn Coccinia indica W& A, two ethnic medicinal plants used in the treatment of diabetes mellitus.*
- American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (22nd ed.). Washington (DC): Water environment federation.
- Anónimo. (29 de 01 de 2016). *b.se-todo.com*. Recuperado el 21 de 04 de 2016, técnicas de saneamiento del suelo: fitorremediación: <http://b.se-todo.com/biolog/4942/index.html>
- Anónimo. (s.f.). *Hidritec*. Recuperado el septiembre de 2015, de Hidritec: <http://www.hidritec.com/hidritec/faqs>
- Arango Ruiz, Á. (Enero-Julio de 2005). Electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de investigación, II(1)*, 49-56.
- Argenbio. (2007). *biotecnología*. Recuperado el 05 de 05 de 2016, de por qué biotecnología: <http://www.porquebiotecnologia.com.ar/adc/uploads/cuad-36-03.gif>
- Arias I, C. A., & Brix, H. (13 de Julio de 2013). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina(13)*, 17-24.
- Árias Martínez, S. A., Betancur Toro, F. M., Gómez Rojas, G., Salazar Giraldo, J. P., & Hernández Ángel, M. L. (12 de 2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador técnico vol 74*, 12-22.
- Arias, C., & Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina N° 13*, 17-24.
- Arias, S. B. (2010). *Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas*. La Salada: Informador técnico vol 74.
- Armstrong, W., Armstrong, J., & Beckett, P. M. (1990). Measuring and modelling of oxygen release from roots of *Phragmites australis*. In: *Constructed wetlands in water pollution control*, Cooper P. F. and Findlater B. C.

- Arroyave Rojas, J. A., & Cruz Castellanos, A. F. (2007). Fotodegradación de las aguas residuales con pesticida Mertect en la industria bananera empleando fotocátalisis con dióxido de titanio y lámpara de luz ultravioleta. *Revista Lasallista de investigación, IV(1)*, 7-13.
- Asamblea Nacional Constituyente. (04 de 07 de 1991). Constitución Política de Colombia. 1991. República de Colombia: Gaceta Constitucional.
- Aulestia Aguilar, K. L. (2012). *Respuestas fisiológicas de tres especies vegetales nativas sometidas a tratamiento con lixiviado de relleno sanitario*. Tesis de grado, Universidad del Valle, Facultad de ciencias naturales y exactas, Santiago de Cali.
- Báez, R. (7 de Abril de 2003). <http://www.monografias.com/>. Recuperado el 2015, de <http://www.monografias.com/trabajos12/contagua/contagua.shtml#HISTOR#ixzz3qdGrXXHT>
- Barrenechea Martel, A. (2012). Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua.
- Berra Gasca, F. (16 de 04 de 2015). *Aluminio y su impacto ambiental*. Recuperado el 08 de 05 de 2016, de impactoambientalaluminio.blogspot.com.
- Blackwell, M., Hogan, D., & Maltby, E. (2002). Wetlands as regulators of pollutant transport. *Agriculture, Hydrology and Water Quality.*, 321-339.
- Brix, H. (1994). Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives. *Water Science and Technology, Vol 30(Núm 8)*, 209-223.
- Brix, H. (2004). Las directrices danesas para los sistemas de humedales construidos en pequeña escala para el tratamiento in situ de aguas residuales domésticas. *Actas de la 9ª Conferencia Internacional en sistemas de humedales para el control de la contaminación del agua*, (pág. 8). Avignon, Francia.
- Brix, H. (2014). *Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales*. Recuperado el 30 de 04 de 2016, de datateca.unad.edu.co: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358039/ContenidoLinea/leccion_43_humedales_artificiales.html
- Cánepa de Vargas, L., Maldonado Yactayo, V., Barrenechea Martel, A., & Aurazo de Zumaeta, M. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría. Lima, Perú.
- Cárdenas Sánchez, A. C. (2012). *Evaluación del desempeño de humedales construidos con plantas nativas tropicales para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios*. Tesis de maestría, Universidad de Sevilla, Escuela técnica superior de ingeniería, Sevilla.

- Cárdenas, J. A. (2005). *Notas de clase, calidad de aguas para estudiantes de ciencias ambientales* (Vol. Vol 1). Santa Fé de Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad del medio ambiente y recursos naturales.
- Carrion, G. (2008). *Manual técnico de difusión sistema de tratamiento de aguas residuales para albergues en zonas rurales*. Ministerio de comercio exterior y turismo, IPES. Lima: Ministerio de comercio exterior y turismo.
- Cartró, J. (2003). *Tratamiento de aguas industriales. Depuración biológica de las aguas residuales*. Barcelona, Ed. Fundación Universitaria Iberoamericana – Universidad de Cataluña, Barcelona, España.
- Castillo, P. A., & Collado, R. (1996). Eliminación de nitrógeno en sistemas naturales de depuración de aguas residuales: análisis comparativo. *Revista técnica de medio ambiente, Retema, Vol 9*(Núm 52), 49-55.
- Catarina. (s.f.). Recuperado el octubre de 2015, de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/hammeken_a_am/capitulo2.pdf
- Cerón, A. V., & Rojas, P. S. (1995). *Uso de macrófitas en depuración de aguas residuales*. Trabajo de grado, Universidad del Valle, Facultad de ingeniería. Programa académico de ingeniería sanitaria., Santiago de Cali.
- COALUM SAS. (s.f.). *Efectos ambientales del aluminio*. Recuperado el 05 de 07 de 2016, de www.coalum.net:inicio/index.php?view=article&catid=38%3Ainformacion-del-aluminio&id=62%3Aefectos-ambientales-del-aluminio&format=pdf&option=com_content&Itemid=29
- CORPONOR. (2012). *Plan de acción ajustado 2007 - 2011*. Cúcuta, Norte de Santander.
- Crites, R. W., & Tchobanoglous, G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Santa Fé de Bogotá, Colombia: Editorial McGraw-Hill.
- Cubillos Vargas, J. A. (Octubre de 2011). *Evaluación de la fitorremediación como alternativa de tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos*. Tesis de maestría, Universidad tecnológica de Pereira, Facultad de ciencias ambientales, Pereira- Colombia.
- DANE. (2005). *Resultados y proyecciones (2005-2020) del censo 2005*. Santa Fé de Bogotá.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Serie técnica, Universidad mayor de San Simón, Cochabamaba, Bolivia.
- Díaz Franky, M. C. (2014). *Generalidades de las aguas residuales en pequeñas comunidades*. Santa Fé de Bogotá D.C.: UNAD.

- Díaz, O. G., & Valdés, G. D. (Ene-Abr de 2011). Metodología para el diseño de humedales con flujo subsuperficial horizontal. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, XXXIII(1), 61-70.
- Ducharme, M. (13 de 08 de 2013). *www.michaelducharme.com*. Recuperado el 18 de 03 de 2016, de <http://www.michaelducharme.com/es/natural-medicine/>
- Duke, J. A. (2008). *Duke's handbook of medicinal plants of Latin America*. CRC Pres.
- Ecured. (25 de 06 de 2011). *Agentes patógenos*. Recuperado en septiembre de 2015, de http://www.ecured.cu/Agentes_pat%C3%B3genos#Organismos_pat.C3.B3genos
- Espigares García, M., & Pérez López, J. A. (1985). Aguas residuales. Composición. En *Aspectos sanitarios del estudio de las aguas* (pág. 22). Granada: Universidad de Granada.
- Garcés Giraldo, L. F., & Peñuela Mesa, G. A. (2007). Tratamiento de las aguas residuales de una industria textil utilizando colector solar. *Revista Lasallista de investigación*, IV(2), 24-31.
- Garcés Giraldo, L. F., Mejía Franco, E. A., & Santamaria Arango, J. J. (2014). Fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de investigación*, I(1), 83-92.
- García, A. M. (2005). *Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el municipio de San Andrés Cholula*. Cholula, Puebla, México.
- Garza, M. A. (2010). *Metodología de la investigación*. Obtenido de Universidad TecMilenio: <http://cursos.tecmilenio.edu.mx/cursos/at8q3ozr5p/master/ed/ed09504/apoyos/1.pdf>
- Geta, J. A., Merino, L. M., & Martínez, P. N. (1997). *Guía operativa para la recogida, almacenamiento y transporte de muestras de agua subterránea destinadas al análisis químico y bacteriológico*. Madrid: IGME.
- Gómez, R., Suárez, M. L., & Vidal-Abarca, M. R. (2001). The performance of a multi-stage system of constructed wetlands for urban wastewater treatment in a semiarid region of SE Spain. *Ecological Engineering*, Vol 16, 501-517.
- Gonzáles. (2011). *Navarra.es*. Recuperado el 7 de octubre de 2015, de http://www.navarra.es/home_es/Temas/Medio+Ambiente/Agua/Documentacion/Parametros/OxigenoDisuelto.htm
- Goyenola, G. (Junio de 2007). *Guía para la utilización de las valijas viajeras*. Cartillas de la Red Mapsa.
- Guevara, A., Guanoluisa, L., & De la Torre, E. (Octubre de 2014). Diseño de sistemas de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario El Inga mediante electrocoagulación y fitorremediación. *Revista EPN*, XXXIV(1), 163.

- Gutierrez Mosquera, H., Peña Varón, M. R., & Aponte Reyes, A. (Diciembre de 2010). Estimación del balance de nitrógeno en un humedal construido subsuperficial plantado con heliconia psittacorum para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista facultad de ingeniería universidad de Antioquia*, 87-98.
- Halverson, N. V. (2004). Review of constructed subsurface flow vs. surface flow wetlands.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. d. (2010). *Metodología de la investigación* (Quinta Edición ed.). Ciudad de México D.F.: McGraw Hill.
- IDEAM. (10 de 09 de 2007). Instructivo para la toma de muestras de aguas residuales. *Toma de muestras de aguas residuales*. Santa Fé de Bogotá D.C., República de Colombia.
- Instituto Colombiano Agropecuario. (2012). *El cultivo de las heliconias- Medidas para la temporada invernal*. Ministerio de agricultura y desarrollo rural, Bogotá D.C. Colombia.
- Irabien Gulías, J. Á., Garea Vásquez, A., Aldaco Garcia, R., Pérez Barrio, Ó., & Sáenz Rodrigo, J. M. (01 de 04 de 2007). Procedimiento para el tratamiento de aguas residuales con fluoruros mediante obtención de fluoruro cálcico sintético. *Oficina española de patentes y marcas*.
- Jerez-Mompié, E. (2007). Revisión bibliográfica. El cultivo de las heliconias. *Cultivos Tropicales*, XXVIII(1), 29-35.
- Kadlec, R. &. (2009). *Treatment wetlands second edition*. New York: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Kadlec, R., & Knight, R. (1996). *Treatment Wetlands*.
- Karl-Slevogt-Straße. (2004). Fosfato, Wissenschaftlich - Technische Werkstätten GMBH. Weilheim, Alemania.
- Karsten, J., Gjengedal, E., & Røysetb, O. (Enero de 2007). Size charge fractionation of metals in municipal solid waste landfill leachate. *Water Research*, 41(1), 47-54.
- Kathya, A. F. (2011). *Tecnologías para el tratamiento de aguas servidas*. Tuxpan.
- Kerlinger, F. N. (2002). *Investigación del comportamiento*. México: McGraw Hill.
- Kolb, P. (1998). *Design of a constructed wetland (pilot plant) for the reclamation of the river Besós*. Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieur, Universität für Bodenkultur.
- La opinión. (15 de 03 de 2011). [Http://www.laopinion.com.co](http://www.laopinion.com.co). Recuperado el 05 de 11 de 2015, de http://www.laopinion.com.co/demo/index.php?option=com_content&task=view&id=369511&itemid=28

- Lahora Cano, A. (2002). Los humedales artificiales como tratamiento terciario de bajo coste en la depuración de aguas residuales urbanas. Almería, España.
- Lara Borrero, J. A. (1999). *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*. Universidad politécnica de Cataluña. Barcelona: Instituto Catalán de tecnología.
- Llagas C., W. A., & Guadalupe G., E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista del instituto de investigaciones FIGMMG, Vol 15*(Núm 17), 85 - 96.
- Londoño Cardona, L. A., & Marin Vanegas, C. (2009). *Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética*. Trabajo de grado, Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de tecnología, Pereira.
- López, R. N. (2009). *Rizofiltración, lixiviación y electro-recuperación: una propuesta integral para Tratamiento de aguas contaminadas con plomo a partir del lirio acuático. (eichhornia crassipes)*. Recuperado el julio de 2015, de uaq:
http://www.uaq.mx/investigacion/revista_ciencia@uaq/Archivos/PDFv2-n1/Rizofiltracion
- Madera Parra, C. A., Peña Salmanca, E. J., & Solarte-Soto, J. A. (2014). Efectos de la concentración de metales pesados en la respuesta fisiológica y capacidad de acumulación de metales de tres especies vegetales tropicales empleadas en la fitorremediación de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios. *Ingeniería y competitividad, 16*(2), 179-188.
- Magaña Alejandro, M. A., Gama Campillo, L. M., & Mariaca Méndez, R. (29 de 03 de 2010). El uso de las plantas medicinales en las comunidades mayachontales de Nacajuca, Tabasco, México. *Polibotánica, 213-263*.
- Maldonado-Mares, F. (2005). *Flora medicinal del estado de Tabasco: Uso, manejo y conservación*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villa hermosa, Tabasco.
- Martelo, J., & Lara Borrero, J. A. (Enero-Junio de 2012). Macrofitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revision del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia, VIII*(15), 221-243.
- Mazza, G. (2007). <http://www.photomazza.com>. Obtenido de Principado de Mónaco:
<http://www.photomazza.com/?Heliconia-psittacorum&lang=es>
- Mejía. (1997). Uso de la rizofiltración para el tratamiento de efluentes líquidos de cianuración que contienen Cromo, Cobre y Cadmio. Caracas, Venezuela.

- Miguel, C. (13 de 01 de 2013). *http://www.iagua.es*. Recuperado el 07 de 05 de 2016, de Humedales artificiales para la depuración de lixiviados de diferentes orígenes: http://www.iagua.es/blogs/carolina-miguel/los-humedales-artificiales-componentes-y-tipos?utm_source=Suscriptores+iagua&utm_campaign=67ac6dc750-RSS_EMAIL_CAMPAIGN_IAGUA&utm_medium=email
- Ministerio de agricultura y desarrollo rural. (2011). *Proyecto: Desarrollo de capacidades en el uso seguro de aguas residuales para agricultura*. Reporte nacional, Bogotá, Colombia.
- Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial. (2001). *Antecedentes de la contaminación hídrica en Colombia*. Estado de la contaminación hídrica nacional, Santa Fé de Bogotá.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (17 de Marzo de 2015). Resolución 0631 de 2015. Santa Fé de Bogotá D.C., Colombia.
- Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (25 de octubre de 2010). Decreto 3930 de 2010. Bogotá D.C, Colombia.
- Ministerio de desarrollo económico, dirección de agua potable y saneamiento básico. (2000). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico*. Santa Fé de Bogotá D.C.
- Montoya, J. I., Ceballos, L., Casas, J. C., & Morató, J. (14 de 12 de 2010). Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies de macrófitas. *Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 75-84.
- Muñoz, L., Nevárez, G., Ballinas, M., & Peralta, M. (2010). Fitorremediación como una alternativa de suelos contaminados. *Revista internacional ciencia tecnología biomédica*, Vol 1(Núm 3), 1-9.
- Nikaido, G. (1995). *Fundamentos y aspectos microbiológicos Biorremediación*. Obtenido de http://www.ingenierosdeminas.org/docu/documentos/fundamentos_%20biorremediación.pdf
- Noyola, A. (2010). *El impacto que ha sufrido el medio ambiente por el vertido de aguas residuales sin tratar*. Instituto de ingeniería UNAM. Ciudad de México: Instituto de ingeniería UNAM.
- Ortíz M, D. F. (2011). *Manual de tratamientos biológicos de aguas residuales para poblaciones medianas de la región sur del Ecuador*. Tesis de pregrado, Universidad técnica particular de Loja, Escuela de ingeniería civil, Loja, Ecuador.

- Ospina Jaramillo, L., & Piñeros Cifuentes, J. A. (2006). *Desarrollo de un modelo productivo de heliconias para la zona cafetera de Caldas*. Universidad de la Salle, Facultad de administración de empresas agropecuarias, Santa Fé de Bogotá D.C.
- Oxford. (s.f.). *definición de color*. New York:
www.oxforddictionaries.com/es/definicion/espanol/color.
- Páez García, L. E. (30 de 03 de 2014). *Academia de historia de Ocaña*. Recuperado el 12 de octubre de 2015, de Academia Ocaña:
<http://academiaocana.blogspot.com.co/2014/03/ocana-la-sequia-y-la-contaminacion.html>
- Panich-Pat, T., Upatham, S., Pokethitiyook, P., Kruatrachue, M., & Lanza, G. R. (14 de 2010). Phytoextraction of metal contaminants by *Typha angustifolia*: Interaction of lead and cadmium in soil-water microcosms. *Journal of environmental protection*, 431-437.
- Peña Guzman, C. A., & Lara Borrero, J. (20 de 11 de 2012). Tratamiento de aguas de escorrentía mediante humedales artificiales: Estado del arte. *Ciencia e ingeniería Neogranadina*, 22, 39-61.
- Peña, C., & Lara, J. (2012). Tratamiento de aguas de escorrentía mediante humedales artificiales: Estado del arte. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 22, N° 2, 39-61.
- Peña, E., Ginneken, M., & Madera, C. (2003). Humedales de flujo subsuperficial: Una alternativa natural para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas tropicales. *Ingeniería y competitividad*, 27-35.
- Peña, E., Madera, C., & Sánchez, J. (2013). Bioprospección de plantas nativas para uso en procesos de biorremediación caso *Heliconia psittacorum*. *Revista académica Colombia Ciencia*, 53.
- Pérez, F., & Camacho, K. (2011). *Tecnologías para el tratamiento de aguas servidas*. Tesis, Universidad Veracruzana, Facultad de ciencias químicas, Tuxpan, México.
- Pilon-Smits, E. (2005). *Phytoremediation Annual Review of Plants Biology*, 56: 15-39.
- Pit Box Blog. (07 de 12 de 2009). *Materia orgánica y materia inorgánica*. Recuperado el 5 de octubre de 2015, de <https://pitbox.wordpress.com>:
<https://pitbox.wordpress.com/2009/12/07/materia-organica-y-materia-inorganica/comment-page-7/>
- Plaza de los Reyes, C., Vera, L., Salvato, M., Borin, M., & Vidal, G. (Junio de 2001). *Consideraciones para la eliminación del nitrógeno en humedales artificiales*. Artículos técnicos, Universidad de Concepción, Centro de Ciencias Ambientales EULA, Chile.

- Quintero, J. V. (2014). *Evaluación de humedales evaporativos para el post tratamiento de aguas residuales domesticas*. Tesis de maestría, Universidad tecnológica de Pereira, Pereira.
- Reed, S. C., Crites, R. W., & Middlebrooks, E. J. (2006). *Natural wastewater treatment systems* (Primera ed.). Estados Unidos: Taylor & Francis Group.
- Ríos, D. A., Toro-Vélez, A., Peña, M., & Madera-Parra, C. (9 de febrero de 2009). Changes of flow patterns in a horizontal subsurface flow constructed wetland treating domestic wastewater in tropical regions. (P. Issue 2, Ed.) *Ecological Engineering*, XXXV, 274-280.
- Rivera, Z., Maldonado, E., & Rios, R. (10 de 2001). Comparación de coliformes y colífagos como indicadores microbiológicos de la calidad del agua en los embalses Dos Bocas y Las Curias en Puerto Rico. *Desarrollo de la Conciencia Ambiental para la Protección del Mundo Futuro AIDIS*. Puerto Rico, Santo Domingo.
- Rocha Castro, E. (2010). Parámetros y características de las aguas naturales. En E. R. Castro, *Ingeniería de tratamiento y acondicionamiento de aguas* (pág. 239). Chihuahua, México: Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Romero Aguilar, M., Colín Cruz, A., Sánchez Salinas, E., & Ortíz Hernández, L. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: Evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 157-167.
- Romero, E., & Hammeken, A. (2005). *Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el municipio de San Andrés Cholula*. Cholula, Puebla, México.
- Romero, J. A. (2002). *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño*. Santa Fé de Bogotá.
- SEMA/EMS. (2006). *Adaptación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en la comunidad urbana de Lacabamba, región Ancash, Perú; usando tecnología de humedales artificiales*. Informe de proyecto comunitario, Universidad nacional mayor de San Marcos (UNMSM), Facultad de ingeniería geológica, minera, metalúrgica y geográfica (IIGEO), Lacabamba.
- SENA y Ministerio de desarrollo económico. (1999). *Incidencias del agua en la salud, captación de aguas y saneamiento*. Bogotá: SENA publicaciones.
- Silva, J., Torres, P., & Madera, C. (2008). Reuso de aguas reiduales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, Vol 26(Núm 2), 347-359.
- Simón, E. (1 de 06 de 2007). <http://www.madrimasd.org/>. Recuperado el 12 de 04 de 2016, de Problemática ambiental de las aguas residuales fluoradas. Tecnologías de tratamiento.: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2007/06/01/66864>



- Sosa Rodríguez, F. M. (01 de 03 de 2013). Cultivo del género Heliconia. *Instituto nacional de ciencias agrícolas*, 34, 24-32.
- Stottmeister, U., Wiessner, A., Kusch, P., Kappelmeyer, U., Kästner, M., Bederski, O. (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*(Núm 22), 93-117.
- Suárez, A., Agudelo, N., Rincón, J., & Millán, N. (30 de Junio de 2014). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas domésticas. (A. Pataquiva-Mateus, Ed.) *Revista Mutis*, Vol 4(Num 1), 8-14.
- Tchobanoglous, G., Crites, R., Gearheart, R., & Reed, S. (2003). *A review of treatment kinetics for constructed wetlands, in the use of aquatic macrophytes for wastewater treatment in constructed wetlands*. (V. a. Dias, Ed.) Lisbon, Portugal: ICN and ANA.
- Tolcachier, A. J. (2004). Enfermedades hídricas de alta prevalencia. Argentina: Roemmers.
- Twenergy. (10 de Abril de 2014). Twenergy. Recuperado el 05 de 11 de 2015, de <http://twenergy.com>: <http://twenergy.com/a/el-tratamiento-de-aguas-residuales-en-colombia-1142>
- UFPSO. (27 de 05 de 2016). (J. G. Arrieta, Ed.) Ocaña, Norte de Santander, Colombia.
- Umber, B. (11 de Julio de 2008). <https://www.flickr.com>. Obtenido de <https://www.flickr.com/photos/rpilla001/2658529312>
- UNAD. (2008). www.unad.edu.co. (N. A. Serrano Forero, Ed.) Recuperado el 19 de 04 de 2016, de www.datateca.unad.edu.co: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/301332/contLinea/leccin_2_caractersticas_de_las_aguas_residuales.html
- UNESCO. (2003). *Agua para todos, agua para la vida* (Vol. I). (Mundi-prensa, Ed.) Paris, Francia: Ediciones UNESCO.
- US-EPA. (2000a). Introduction to Phytoremediation. *Office of Research and Development. National Risk Management Research Laboratory Cincinnati, Ohio 45268*.
- US-EPA. (2000b). Constructed wetlands treatment of municipal wastewater. *EPA/625/R-99/010, Office of research and development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH*.
- Vymazal, J. (2009). The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological Engineering*, Vol 35, 1-17.

Vymazal, J., & Kropfelova, L. (2008). Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review of the field experience. *Science of the Total environment*.

World Health Organization & Panamerican Health Organization. (1987). *Guías para la calidad del agua potable*. Ginebra, Suiza: Panamerican Health Org.

Apéndices

Apéndice A. Evaluación del nivel de contaminación de las muestras por triplicado con su promedio (\bar{x}) y desviación estándar (σ).

	<p>MATRIZ DE LA MUESTRA: Agua Residual TIPO DE MUESTRA: Simple TOMADA POR: Luisa Sánchez – Fabián Vélez HORA Y FECHA: 6:00 am – 25/05/2016 SITIO: Sistema Piloto – Antes de tratamiento NÚMERO DE MUESTRA: Afluyente 1 – Af1</p>	
---	---	---

FORMATO PARA ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL

Agua residual generada por la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña sin ningún tratamiento previo.

RESOLUCIÓN 0631 DEL 17 DE MARZO
DE 2015

“Actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los capítulos V y VI con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial.” Artículo 15

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ
		1	2	3		
Generales						
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	402,1	395,8	398,8	398,9	3,15
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	532,5	538,1	539,2	536,6	3,59
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	mg/L	347,9	348,5	346,6	347,6	0,971
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	1,9	1,9	1,9	1,9	0,0
Grasas y Aceites	mg/L	81	79	80	80	1,00
Compuestos de Fósforo						
Fosfatos	mg/L	5,73	5,73	5,73	5,73	0,0
Fósforo Total	mg/L	1,91	1,91	1,91	1,91	0,0
Compuestos de Nitrógeno						
Nitratos	mg/L	41,8	41,36	41,8	41,65	0,254
Nitritos	mg/L	66,0	69,3	69,3	68,2	1,91
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	2,04	2,07	2,04	2,05	0,017
Nitrógeno Total	mg/L	97,38	97,38	97,38	97,38	0,0
Iones						
Fluoruros	mg/L	1,75	1,74	1,75	1,74	0,005
Sulfatos	mg/L	25	26	26	25,6	0,577

Metales y Metaloides

Aluminio (Al)	mg/L	0,047	0,047	0,048	0,047	0,00
Cobre (Cu)	mg/L	1,35	1,36	1,35	1,35	0,005
Hierro (Fe)	mg/L	1,59	1,59	1,60	1,59	0,005

Otros parámetros para Análisis y Reporte

Color real	UPtCo	309	325	318	317,3	8,02
Conductividad	μS/cm	1,13	1,16	1,18	1,156	0,025
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	500	525	510	511,6	12,58
Dureza total	mg/L CaCO ₃	>50	>50	>50	>50	

RESOLUCION 0631 DEL 17 DE
MARZO DE 2015

“Cuando la carga másica antes del tratamiento es mayor a 125
kg/ día de DBO₅.” Artículo 6

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ'
Coliformes Termotolerantes						
Coliformes Totales	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0
E. Coli	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0

Parámetros medidos *in situ*

pH: 7,8 Temperatura: 22,1 °C Conductividad: 1,156 μS/cm

Turbiedad: 7,7 UNT Volumen de muestra recogido: 2,5 litros



MATRIZ DE LA MUESTRA: Agua Residual
TIPO DE MUESTRA: Simple
TOMADA POR: Luisa Sánchez - Fabián Vélez
HORA Y FECHA: 6:00am – 27/05/2016
SITIO: Sistema Piloto – Unidad Experimental 1
NÚMERO DE MUESTRA: Muestra 1 – M1



FORMATO PARA ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL

Especie Vegetal: *Costus spicatus* Tiempo: 48 horas Volumen de agua: 25 Litros

RESOLUCIÓN 0631 DEL 17 DE MARZO
DE 2015

“Actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los capítulos V y VI con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial.” Artículo 15

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ
		1	2	3		
Generales						
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	145	138	142	141,6	3,51
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	404	402	398	401,3	3,06
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	75,2	71,3	80,4	75,6	4,57
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
Grasas y Aceites	mg/L	30,4	33,3	31,4	31,7	1,47
Compuestos de Fósforo						
Fosfatos	mg/L	1,69	1,68	1,69	1,68	0,005
Fósforo Total	mg/L	0,56	0,56	0,56	0,56	0,0
Compuestos de Nitrógeno						
Nitratos	mg/L	39,16	40,04	39,25	39,48	0,48
Nitritos	mg/L	59,4	59,4	62,7	60,5	1,91
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,74	0,72	0,73	0,73	0,01
Nitrógeno Total	mg/L	16,67	16,67	16,67	16,67	0,0
Iones						
Fluoruros	mg/L	0,28	0,27	0,28	0,27	0,005
Sulfatos	mg/L	24	24	24	24	0,0
Metales y Metaloides						
Aluminio (Al)	mg/L	0,010	0,010	0,011	0,010	0,0
Cobre (Cu)	mg/L	0,44	0,45	0,44	0,44	0,005

Hierro (Fe)	mg/L	1,96	1,95	1,96	1,96	0,005
Otros parámetros para Análisis y Reporte						
Color real	UPtCo	240	236	239	238,3	2,08
Conductividad	μS/cm	0,88	0,85	0,87	0,866	0,015
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	504	480	486	490	12,49
Dureza total	mg/L CaCO ₃	>50	>50	>50	>50	

RESOLUCION 0631 DEL 17 DE
MARZO DE 2015

“Cuando la carga másica antes del tratamiento es mayor a 125
kg/ día de DBO₅.” Artículo 6

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ'
Coliformes Termotolerantes						
Coliformes Totales	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0
E. Coli	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0

Parámetros medidos *in situ*

pH: 7,1 Temperatura: 22,1 °C Conductividad: 0,866 μS/cm

Turbiedad: 0,0 UNT Volumen de muestra recogido: 2,5 litros



MATRIZ DE LA MUESTRA: Agua Residual
TIPO DE MUESTRA: Simple
TOMADA POR: Luisa Sánchez - Fabián Vélez
HORA Y FECHA: 6:00 am – 27/05/2016
SITIO: Sistema Piloto – Unidad Experimental 2
NÚMERO DE MUESTRA: Muestra 2 – M2



FORMATO PARA ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL

Especie Vegetal: *Heliconia psittacorum* Tiempo: 48 horas Volumen de agua: 25 Litros

RESOLUCIÓN 0631 DEL 17 DE MARZO
DE 2015

“Actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los capítulos V y VI con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial.” Artículo 15

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ
		1	2	3		
Generales						
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	121	127	134	127,3	6,51
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	305	310	313	309,3	4,04
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	46,3	45,4	47,5	46,4	1,054
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	0,05	0,05	0,05	0,05	0,0
Grasas y Aceites	mg/L	31,7	32	32,8	32,1	0,569
Compuestos de Fósforo						
Fosfatos	mg/L	0,60	0,61	0,62	0,61	0,01
Fósforo Total	mg/L	0,20	0,20	0,20	0,20	0,0
Compuestos de Nitrógeno						
Nitratos	mg/L	33	33	33	33	0,0
Nitritos	mg/L	56,1	59,4	59,4	58,3	1,91
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,64	0,65	0,66	0,65	0,010
Nitrógeno Total	mg/L	14,67	14,67	14,67	14,67	0,0
Iones						
Fluoruros	mg/L	0,29	0,27	0,27	0,27	0,011
Sulfatos	mg/L	22	23	23	22,6	0,577
Metales y Metaloides						
Aluminio (Al)	mg/L	0,011	0,010	0,010	0,010	0,001
Cobre (Cu)	mg/L	0,31	0,31	0,32	0,31	0,005

Hierro (Fe)	mg/L	0,58	0,58	0,59	0,58	0,005
Otros parámetros para Análisis y Reporte						
Color real	UPtCo	206	208	203	205,6	2,52
Conductividad	μS/cm	0,74	0,78	0,79	0,77	0,026
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	490	480	485	485	5,0
Dureza total	mg/L CaCO ₃	>50	>50	>50	>50	

RESOLUCION 0631 DEL 17 DE
MARZO DE 2015

“Cuando la carga másica antes del tratamiento es mayor a 125
kg/ día de DBO₅.” Artículo 6

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ'
Coliformes Termotolerantes						
Coliformes Totales	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0
E. Coli	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0

Parámetros medidos *in situ*

pH: 7,2 Temperatura: 21,5 °C Conductividad: 0,770 μS/cm

Turbiedad: 0,0 UNT Volumen de muestra recogido: 2,5 litros



MATRIZ DE LA MUESTRA: Agua Residual
TIPO DE MUESTRA: Simple
TOMADA POR: Luisa Sánchez - Fabián Vélez
HORA Y FECHA: 6:00 am – 27/05/2016
SITIO: Sistema Piloto – Unidad Experimental 3
NÚMERO DE MUESTRA: Muestra 3 – M3



FORMATO PARA ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL

Especie Vegetal: *Heliconia psittacorum* y *Costus spicatus* Tiempo: 48 horas Volumen de agua: 25 Litros

RESOLUCIÓN 0631 DEL 17 DE MARZO
DE 2015

“Actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los capítulos V y VI con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial.” Artículo 15

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ
		1	2	3		
Generales						
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	139,1	139,3	140,1	139,5	0,529
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	340	342,2	345	342,4	2,51
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	54	57	57	56	1,73
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	0,05	0,05	0,05	0,05	0,0
Grasas y Aceites	mg/L	31,7	34,7	31,4	32,6	1,82
Compuestos de Fósforo						
Fosfatos	mg/L	1,42	1,43	1,45	1,43	0,015
Fósforo Total	mg/L	0,47	0,47	0,48	0,47	0,005
Compuestos de Nitrógeno						
Nitratos	mg/L	37,4	38,28	38,72	38,13	0,672
Nitritos	mg/L	57,5	58,7	60,02	58,74	1,26
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,63	0,64	0,63	0,63	0,005
Nitrógeno Total	mg/L	14,67	14,67	14,67	14,67	0,0
Iones						
Fluoruros	mg/L	0,44	0,44	0,44	0,44	0,0
Sulfatos	mg/L	23	23	23	23	0,0
Metales y Metaloides						
Aluminio (Al)	mg/L	0,011	0,011	0,010	0,011	0,001
Cobre (Cu)	mg/L	0,39	0,39	0,40	0,39	0,005

Hierro (Fe)	mg/L	1,59	1,59	1,60	1,59	0,005
Otros parámetros para Análisis y Reporte						
Color real	UPtCo	221	215	209	215	6,0
Conductividad	μS/cm	0,81	0,83	0,81	0,816	0,011
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	485	480	505	490	13,23
Dureza total	mg/L CaCO ₃	>50	>50	>50	>50	

RESOLUCION 0631 DEL 17 DE
MARZO DE 2015

“Cuando la carga másica antes del tratamiento es mayor a 125
kg/ día de DBO₅.” Artículo 6

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ'
Coliformes Termotolerantes						
Coliformes Totales	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0
E. Coli	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0

Parámetros medidos *in situ*

pH: 7,2 Temperatura: 21,9 °C Conductividad: 0,816 μS/cm

Turbiedad: 0,0 UNT Volumen de muestra recogido: 2,5 litros



MATRIZ DE LA MUESTRA: Agua Residual
TIPO DE MUESTRA: Simple
TOMADA POR: Luisa Sánchez – Fabián Vélez
HORA Y FECHA: 6:00 am – 27/05/2016
SITIO: Sistema Piloto – Antes de tratamiento
NÚMERO DE MUESTRA: Afluente 2 – Af2



FORMATO PARA ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL

Agua residual generada por la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña sin ningún tratamiento previo.

RESOLUCIÓN 0631 DEL 17 DE MARZO
DE 2015

“Actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los capítulos V y VI con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial.” Artículo 15

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ
		1	2	3		
Generales						
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	389	382	385	385,3	3,51
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	450	440	440	443,3	5,77
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	337	336,2	336	336,4	0,529
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	1,9	1,9	1,9	1,9	0,0
Grasas y Aceites	mg/L	80	78,5	78,7	79	0,814
Compuestos de Fósforo						
Fosfatos	mg/L	5,70	5,70	5,70	5,70	0,0
Fósforo Total	mg/L	1,9	1,9	1,9	1,9	0,0
Compuestos de Nitrógeno						
Nitratos	mg/L	36,52	36,52	37,4	36,81	0,508
Nitritos	mg/L	59,4	56,1	59,4	58,3	1,91
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	1,98	1,97	2,00	1,98	0,015
Nitrógeno Total	mg/L	98,04	98,04	98,04	98,04	0,0
Iones						
Fluoruros	mg/L	1,29	1,28	1,28	1,28	0,005
Sulfatos	mg/L	22	23	22	22,3	0,577
Metales y Metaloides						
Aluminio (Al)	mg/L	0,049	0,051	0,050	0,050	0,001

Cobre (Cu)	mg/L	1,69	1,70	1,69	1,69	0,005
Hierro (Fe)	mg/L	1,82	1,83	1,82	1,82	0,005
Otros parámetros para Análisis y Reporte						
Color real	UPtCo	437	446	440	441,0	4,58
Conductividad	$\mu\text{S/cm}$	1,10	1,12	1,15	1,123	0,025
Alcalinidad	mg/L CaCO_3	555	535	545	545,0	10,0
Dureza total	mg/L CaCO_3	>50	>50	>50	>50	

RESOLUCION 0631 DEL 17 DE
MARZO DE 2015

“Cuando la carga másica antes del tratamiento es mayor a 125
kg/ día de DBO₅.” Artículo 6

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ'
Coliformes Termotolerantes						
Coliformes Totales	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0
E. Coli	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0

Parámetros medidos *in situ*

pH: 7,6 Temperatura: 21,8 °C Conductividad: 1,123 $\mu\text{S/cm}$

Turbiedad: 6,4 UNT Volumen de muestra recogido: 2,5 litros



MATRIZ DE LA MUESTRA: Agua Residual
TIPO DE MUESTRA: Simple
TOMADA POR: Luisa Sánchez - Fabián Vélez
HORA Y FECHA: 6:00 am – 01/06/2016
SITIO: Sistema Piloto – Unidad Experimental 1
NÚMERO DE MUESTRA: Muestra 4 – M4



FORMATO PARA ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL

Especie Vegetal: *Costus spicatus* Tiempo: 120 horas Volumen de agua: 25 Litros

RESOLUCIÓN 0631 DEL 17 DE MARZO
DE 2015

“Actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los capítulos V y VI con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial.” Artículo 15

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ
		1	2	3		
Generales						
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	83	83	83	83	0,0
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	90	85	92,5	89,2	3,82
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	45	50	39,4	44,8	5,30
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0
Grasas y Aceites	mg/L	24	23,9	26,7	24,8	1,58
Compuestos de Fósforo						
Fosfatos	mg/L	2,82	2,82	2,82	2,82	0,0
Fósforo Total	mg/L	0,94	0,94	0,94	0,94	0,0
Compuestos de Nitrógeno						
Nitratos	mg/L	24,2	23,76	23,76	23,90	0,254
Nitritos	mg/L	33	33	33	33	0,0
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,67	0,68	0,67	0,67	0,005
Nitrógeno Total	mg/L	16,00	16,00	16,00	16,00	0,0
Iones						
Fluoruros	mg/L	0,26	0,26	0,26	0,26	0,0
Sulfatos	mg/L	5	6	6	5,6	0,577
Metales y Metaloides						
Aluminio (Al)	mg/L	0,034	0,030	0,032	0,032	0,002
Cobre (Cu)	mg/L	1,59	1,58	1,57	1,58	0,010

Hierro (Fe)	mg/L	7,52	7,52	7,52	7,52	0,0
Otros parámetros para Análisis y Reporte						
Color real	UPtCo	267	256	257	260	6,08
Conductividad	μS/cm	1,07	1,08	1,07	1,073	0,005
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	515	517	513	515	2,0
Dureza total	mg/L CaCO ₃	>50	>50	>50	>50	

RESOLUCION 0631 DEL 17 DE
MARZO DE 2015

“Cuando la carga másica antes del tratamiento es mayor a 125
kg/ día de DBO₅.” Artículo 6

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ'
Coliformes Termotolerantes						
Coliformes Totales	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0
E. Coli	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0

Parámetros medidos *in situ*

pH: 7,2 Temperatura: 22,1 °C Conductividad: 1,073 μS/cm

Turbiedad: 0,0 UNT Volumen de muestra recogido: 2,5 litros



MATRIZ DE LA MUESTRA: Agua Residual
TIPO DE MUESTRA: Simple
TOMADA POR: Luisa Sánchez - Fabián Vélez
HORA Y FECHA: 6:00 am – 01/06/2016
SITIO: Sistema Piloto – Unidad Experimental 2
NÚMERO DE MUESTRA: Muestra 5 – M5



FORMATO PARA ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL

Especie Vegetal: *Heliconia psittacorum* Tiempo: 120 horas Volumen de agua: 25 Litros

RESOLUCIÓN 0631 DEL 17 DE MARZO
DE 2015

“Actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los capítulos V y VI con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial.” Artículo 15

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ
		1	2	3		
Generales						
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	80,2	82,8	80,9	81,3	1,345
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	44	55	52,2	50,4	5,72
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	37,9	36,9	35,7	36,8	1,102
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0
Grasas y Aceites	mg/L	23,6	24,1	25,1	24,2	0,765
Compuestos de Fósforo						
Fosfatos	mg/L	2,70	2,70	2,70	2,70	0,0
Fósforo Total	mg/L	0,90	0,90	0,90	0,90	0,0
Compuestos de Nitrógeno						
Nitratos	mg/L	23,32	23,32	23,32	23,32	0,0
Nitritos	mg/L	29,7	31,2	28,2	29,7	1,50
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,55	0,55	0,55	0,55	0,0
Nitrógeno Total	mg/L	18,10	18,10	18,10	18,10	0,0
Iones						
Fluoruros	mg/L	0,25	0,27	0,26	0,25	0,010
Sulfatos	mg/L	4	4	5	4,3	0,577
Metales y Metaloides						
Aluminio (Al)	mg/L	0,022	0,018	0,018	0,019	0,002
Cobre (Cu)	mg/L	0,90	0,89	0,90	0,89	0,005

Hierro (Fe)	mg/L	4,28	4,28	4,28	4,28	0,0
Otros parámetros para Análisis y Reporte						
Color real	UPtCo	157	162	165	161,6	3,51
Conductividad	μS/cm	0,97	1,01	0,99	0,993	0,021
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	435	445	465	448,3	15,28
Dureza total	mg/L CaCO ₃	>50	>50	>50	>50	

RESOLUCION 0631 DEL 17 DE
MARZO DE 2015

“Cuando la carga másica antes del tratamiento es mayor a 125
kg/ día de DBO₅.” Artículo 6

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ'
Coliformes Termotolerantes						
Coliformes Totales	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0
E. Coli	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0

Parámetros medidos *in situ*

pH: 7,8 Temperatura: 22,1 °C Conductividad: 0,993 μS/cm

Turbidez: 7,7 UNT Volumen de muestra recogido: 2,5 litros



MATRIZ DE LA MUESTRA: Agua Residual
TIPO DE MUESTRA: Simple
TOMADA POR: Luisa Sánchez - Fabián Vélez
HORA Y FECHA: 6:00 am – 01/06/2016
SITIO: Sistema Piloto – Unidad Experimental 3
NÚMERO DE MUESTRA: Muestra 6 – M6



FORMATO PARA ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL

Especie Vegetal: *Heliconia psittacorum* y *Costus spicatus* Tiempo: 120 horas Volumen de agua: 25 Litros

RESOLUCIÓN 0631 DEL 17 DE MARZO
DE 2015

“Actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los capítulos V y VI con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial.” Artículo 15

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ
		1	2	3		
Generales						
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	104,3	105,8	103,9	104,6	1,0
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	62,75	65	70	65,9	3,71
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	41	42,5	40,3	41,2	1,12
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0
Grasas y Aceites	mg/L	24,6	26,3	25	25,3	0,88
Compuestos de Fósforo						
Fosfatos	mg/L	2,75	2,73	2,76	2,74	0,02
Fósforo Total	mg/L	0,91	0,91	0,92	0,91	0,01
Compuestos de Nitrógeno						
Nitratos	mg/L	25,96	25,52	25,52	25,66	0,254
Nitritos	mg/L	33	33	35,2	33,7	1,27
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,54	0,54	0,55	0,54	0,005
Nitrógeno Total	mg/L	25,34	25,34	25,34	25,34	0,0
Iones						
Fluoruros	mg/L	0,36	0,37	0,36	0,36	0,005
Sulfatos	mg/L	5	5	5	5	0,0
Metales y Metaloides						
Aluminio (Al)	mg/L	0,024	0,025	0,024	0,024	0,001
Cobre (Cu)	mg/L	1,39	1,41	1,42	1,40	0,015

Hierro (Fe)	mg/L	5,64	5,64	5,67	5,65	0,017
Otros parámetros para Análisis y Reporte						
Color real	UPtCo	193	201	189	194,3	6,11
Conductividad	μS/cm	1,03	1,00	1,05	1,026	0,025
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	475	460	490	475,0	15,0
Dureza total	mg/L CaCO ₃	>50	>50	>50	>50	

RESOLUCION 0631 DEL 17 DE
MARZO DE 2015

“Cuando la carga másica antes del tratamiento es mayor a 125
kg/ día de DBO₅.” Artículo 6

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ'
Coliformes Termotolerantes						
Coliformes Totales	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0
E. Coli	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0

Parámetros medidos *in situ*

pH: 7,2 Temperatura: 22,1 °C Conductividad: 1,026 μS/cm

Turbidez: 0,0 UNT Volumen de muestra recogido: 2,5 litros



MATRIZ DE LA MUESTRA: Agua Residual
TIPO DE MUESTRA: Simple
TOMADA POR: Luisa Sánchez – Fabián Vélez
HORA Y FECHA: 6:00 am – 01/06/2016
SITIO: Sistema Piloto – Antes de tratamiento
NÚMERO DE MUESTRA: Afluente 3 – Af3



FORMATO PARA ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL

Agua residual generada por la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña sin ningún tratamiento previo.

RESOLUCIÓN 0631 DEL 17 DE MARZO
DE 2015

“Actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los capítulos V y VI con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial.” Artículo 15

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ
		1	2	3		
Generales						
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	346,8	350	345,2	347,3	2,44
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	478,9	478,1	470,1	475,7	4,87
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	314,4	314,5	315,5	314,8	0,608
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	1,9	1,9	1,9	1,9	0,0
Grasas y Aceites	mg/L	71,9	71,3	73	72	0,862
Compuestos de Fósforo						
Fosfatos	mg/L	5,85	5,85	5,88	5,86	0,017
Fósforo Total	mg/L	1,95	1,95	1,96	1,95	0,005
Compuestos de Nitrógeno						
Nitratos	mg/L	47,52	47,08	46,64	47,08	0,440
Nitritos	mg/L	71,62	72,60	74,90	73,0	1,68
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	2,34	2,32	2,33	2,33	0,010
Nitrógeno Total	mg/L	101,3	101,3	101,3	101,3	0,0
Iones						
Fluoruros	mg/L	1,35	1,37	1,42	1,38	0,036
Sulfatos	mg/L	34	34	34	34	0,0
Metales y Metaloides						
Aluminio (Al)	mg/L	0,087	0,086	0,086	0,086	0,0

Cobre (Cu)	mg/L	1,91	1,93	1,94	1,92	0,015
Hierro (Fe)	mg/L	1,36	1,36	1,36	1,36	0,0
Otros parámetros para Análisis y Reporte						
Color real	UPtCo	466	456	456	459,3	5,77
Conductividad	$\mu\text{S/cm}$	1,15	1,13	1,15	1,143	0,011
Alcalinidad	mg/L CaCO_3	527	545	543	538,3	9,87
Dureza total	mg/L CaCO_3	>50	>50	>50	>50	

RESOLUCION 0631 DEL 17 DE
MARZO DE 2015

“Cuando la carga másica antes del tratamiento es mayor a 125
kg/ día de DBO₅.” Artículo 6

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ'
Coliformes Termotolerantes						
Coliformes Totales	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0
E. Coli	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0

Parámetros medidos *in situ*

pH: 8,1 Temperatura: 22,1 °C Conductividad: 1,143 $\mu\text{S/cm}$

Turbidez: 28,1 UNT Volumen de muestra recogido: 2,5 litros



MATRIZ DE LA MUESTRA: Agua Residual
TIPO DE MUESTRA: Simple
TOMADA POR: Luisa Sánchez - Fabián Vélez
HORA Y FECHA: 6:00 am – 03/06/2016
SITIO: Sistema Piloto – Unidad Experimental 1
NÚMERO DE MUESTRA: Muestra 7 – M7



FORMATO PARA ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL

Especie Vegetal: *Costus spicatus* Tiempo: 48 horas Volumen de agua: 12,5 Litros

RESOLUCIÓN 0631 DEL 17 DE MARZO
DE 2015

“Actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los capítulos V y VI con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial.” Artículo 15

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ
		1	2	3		
Generales						
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	74	72	75	73,6	1,52
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	240,3	234,8	235,6	236,9	2,97
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	28,9	29	29,7	29,2	0,436
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	0,01	0,03	0,02	0,02	0,014
Grasas y Aceites	mg/L	20,2	20,1	21	20,4	0,493
Compuestos de Fósforo						
Fosfatos	mg/L	2,94	2,94	2,92	2,93	0,011
Fósforo Total	mg/L	0,98	0,98	0,97	0,97	0,005
Compuestos de Nitrógeno						
Nitratos	mg/L	22,44	22,88	22	22,44	0,440
Nitritos	mg/L	36,3	33	33	34,1	1,91
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,85	0,85	0,86	0,85	0,005
Nitrógeno Total	mg/L	16,0	16,0	16,0	16,0	0,0
Iones						
Fluoruros	mg/L	0,19	0,20	0,19	0,19	0,005
Sulfatos	mg/L	24	25	24	24,3	0,577
Metales y Metaloides						
Aluminio (Al)	mg/L	0,067	0,066	0,066	0,066	0,0
Cobre (Cu)	mg/L	1,46	1,45	1,45	1,45	0,005

Hierro (Fe)	mg/L	6,99	6,99	6,99	6,99	0,0
Otros parámetros para Análisis y Reporte						
Color real	UPtCo	87	86	87	86,6	0,577
Conductividad	μS/cm	0,99	0,99	0,99	0,99	0,0
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	525	505	515	515	10,0
Dureza total	mg/L CaCO ₃	>50	>50	>50	>50	

RESOLUCION 0631 DEL 17 DE
MARZO DE 2015

“Cuando la carga másica antes del tratamiento es mayor a 125
kg/ día de DBO₅.” Artículo 6

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ'
Coliformes Termotolerantes						
Coliformes Totales	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0
E. Coli	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0

Parámetros medidos *in situ*

pH: 7,3 Temperatura: 22,6 °C Conductividad: 0,99 μS/cm

Turbidez: 0,0 UNT Volumen de muestra recogido: 2,5 litros



MATRIZ DE LA MUESTRA: Agua Residual
TIPO DE MUESTRA: Simple
TOMADA POR: Luisa Sánchez - Fabián Vélez
HORA Y FECHA: 6:00 am – 03/06/2016
SITIO: Sistema Piloto – Unidad Experimental 2
NÚMERO DE MUESTRA: Muestra 8 – M8



FORMATO PARA ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL

Especie Vegetal: *Heliconia psittacorum* Tiempo: 48 horas Volumen de agua: 12,5 Litros

RESOLUCIÓN 0631 DEL 17 DE MARZO
DE 2015

“Actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los capítulos V y VI con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial.” Artículo 15

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ
		1	2	3		
Generales						
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	20	27	23	23,3	3,51
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	140	131,2	139,2	136,8	4,87
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	20,0	20,3	21	20,4	0,513
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0
Grasas y Aceites	mg/L	16,2	15,5	15,5	15,7	0,404
Compuestos de Fósforo						
Fosfatos	mg/L	1,54	1,54	1,54	1,54	0,0
Fósforo Total	mg/L	0,51	0,51	0,51	0,51	0,0
Compuestos de Nitrógeno						
Nitratos	mg/L	9,24	9,24	9,24	9,24	0,0
Nitritos	mg/L	13,2	13,5	13,8	13,5	0,300
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,53	0,53	0,54	0,53	0,006
Nitrógeno Total	mg/L	15,34	15,34	15,34	15,34	0,0
Iones						
Fluoruros	mg/L	0,18	0,18	0,18	0,18	0,0
Sulfatos	mg/L	23	23	23	23	0,0
Metales y Metaloides						
Aluminio (Al)	mg/L	0,029	0,033	0,033	0,031	0,002
Cobre (Cu)	mg/L	0,35	0,35	0,35	0,35	0,0

Hierro (Fe)	mg/L	2,49	2,49	2,49	2,49	0,0
Otros parámetros para Análisis y Reporte						
Color real	UPtCo	72	71	72	71,6	0,577
Conductividad	μS/cm	0,76	0,76	0,76	0,76	0,0
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	405	425	415	415	10,0
Dureza total	mg/L CaCO ₃	>50	>50	>50	>50	

RESOLUCION 0631 DEL 17 DE
MARZO DE 2015

“Cuando la carga másica antes del tratamiento es mayor a 125
kg/ día de DBO₅.” Artículo 6

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ'
Coliformes Termotolerantes						
Coliformes Totales	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0
E. Coli	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0

Parámetros medidos *in situ*

pH: 7,3 Temperatura: 22,5 °C Conductividad: 0,76 μS/cm

Turbiedad: 0,0 UNT Volumen de muestra recogido: 2,5 litros



MATRIZ DE LA MUESTRA: Agua Residual
TIPO DE MUESTRA: Simple
TOMADA POR: Luisa Sánchez - Fabián Vélez
HORA Y FECHA: 6:00 am – 03/06/2016
SITIO: Sistema Piloto – Unidad Experimental 3
NÚMERO DE MUESTRA: Muestra 9 – M9



FORMATO PARA ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL

Especie Vegetal: *Heliconia psittacorum* y *Costus spicatus* Tiempo: 48 horas Volumen de agua: 12,5 Litros

RESOLUCIÓN 0631 DEL 17 DE MARZO
DE 2015

“Actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los capítulos V y VI con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial.” Artículo 15

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ
		1	2	3		
Generales						
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	42	41	32	38,3	5,51
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	201,6	198,7	195,5	198,6	3,05
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	23,4	25,1	23,7	24	0,907
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	0,02	0,02	0,01	0,02	0,005
Grasas y Aceites	mg/L	19,2	17,7	17,7	18,2	0,866
Compuestos de Fósforo						
Fosfatos	mg/L	2,1	2,1	2,1	2,1	0,0
Fósforo Total	mg/L	0,70	0,70	0,70	0,70	0,0
Compuestos de Nitrógeno						
Nitratos	mg/L	18,48	18,48	18,48	18,48	0,0
Nitritos	mg/L	20,46	19,23	22,11	20,6	1,445
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,56	0,57	0,56	0,56	0,005
Nitrógeno Total	mg/L	14,0	14,0	14,0	14,0	0,0
Iones						
Fluoruros	mg/L	0,20	0,20	0,21	0,20	0,005
Sulfatos	mg/L	25	26	25	25,3	0,577
Metales y Metaloides						
Aluminio (Al)	mg/L	0,042	0,046	0,047	0,045	0,002
Cobre (Cu)	mg/L	1,47	1,47	1,47	1,47	0,0

Hierro (Fe)	mg/L	5,4	5,4	5,4	5,4	0,0
Otros parámetros para Análisis y Reporte						
Color real	UPtCo	78	78	78	78	0,0
Conductividad	μS/cm	0,82	0,82	0,82	0,82	0,0
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	515	505	505	510	5,0
Dureza total	mg/L CaCO ₃	>50	>50	>50	>50	

RESOLUCION 0631 DEL 17 DE
MARZO DE 2015

“Cuando la carga másica antes del tratamiento es mayor a 125
kg/ día de DBO₅.” Artículo 6

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ'
Coliformes Termotolerantes						
Coliformes Totales	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0
E. Coli	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0

Parámetros medidos *in situ*

pH: 7,2 Temperatura: 22,5 °C Conductividad: 0,82 μS/cm

Turbiedad: 0,0 UNT Volumen de muestra recogido: 2,5 litros



MATRIZ DE LA MUESTRA: Agua Residual
TIPO DE MUESTRA: Simple
TOMADA POR: Luisa Sánchez – Fabián Vélez
HORA Y FECHA: 6:00 am – 03/06/2016
SITIO: Sistema Piloto – Antes de tratamiento
NÚMERO DE MUESTRA: Afluente 4 – Af4



FORMATO PARA ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL

Agua residual generada por la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña sin ningún tratamiento previo.

RESOLUCIÓN 0631 DEL 17 DE MARZO
DE 2015

“Actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los capítulos V y VI con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial.” Artículo 15

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ
		1	2	3		
Generales						
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	346,8	350	345,2	347,3	2,44
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	478,9	478,1	470,1	475,7	4,87
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	314,4	314,5	315,5	314,8	0,608
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	1,9	1,9	1,9	1,9	0,0
Grasas y Aceites	mg/L	71,9	71,3	73	72	0,862
Compuestos de Fósforo						
Fosfatos	mg/L	5,85	5,85	5,88	5,86	0,017
Fósforo Total	mg/L	1,95	1,95	1,96	1,95	0,005
Compuestos de Nitrógeno						
Nitratos	mg/L	47,52	47,08	46,64	47,08	0,440
Nitritos	mg/L	71,62	72,60	74,90	73,0	1,68
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	2,34	2,32	2,33	2,33	0,010
Nitrógeno Total	mg/L	101,3	101,3	101,3	101,3	0,0
Iones						
Fluoruros	mg/L	1,35	1,37	1,42	1,38	0,036
Sulfatos	mg/L	34	34	34	34	0,0
Metales y Metaloides						
Aluminio (Al)	mg/L	0,087	0,086	0,086	0,086	0,0

Cobre (Cu)	mg/L	1,91	1,93	1,94	1,92	0,015
Hierro (Fe)	mg/L	1,36	1,36	1,36	1,36	0,0
Otros parámetros para Análisis y Reporte						
Color real	UPtCo	466	456	456	459,3	5,77
Conductividad	μS/cm	1,15	1,13	1,15	1,143	0,011
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	527	545	543	538,3	9,87
Dureza total	mg/L CaCO ₃	>50	>50	>50	>50	

RESOLUCION 0631 DEL 17 DE
MARZO DE 2015

“Cuando la carga másica antes del tratamiento es mayor a 125
kg/ día de DBO₅.” Artículo 6

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ'
Coliformes Termotolerantes						
Coliformes Totales	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0
E. Coli	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0

Parámetros medidos *in situ*

pH: 8,1 Temperatura: 22,1 °C Conductividad: 1,14 μS/cm

Turbiedad: 28,1 UNT Volumen de muestra recogido: 2,5 litros



MATRIZ DE LA MUESTRA: Agua Residual
TIPO DE MUESTRA: Simple
TOMADA POR: Luisa Sánchez - Fabián Vélez
HORA Y FECHA: 6:00 am – 08/06/2016
SITIO: Sistema Piloto – Unidad Experimental 1
NÚMERO DE MUESTRA: Muestra 10 – M10



FORMATO PARA ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL

Especie Vegetal: *Costus spicatus* Tiempo: 120 horas Volumen de agua: 12,5 Litros

RESOLUCIÓN 0631 DEL 17 DE MARZO
DE 2015

“Actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los capítulos V y VI con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial.” Artículo 15

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ
		1	2	3		
Generales						
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	31,4	33,5	26	30,3	3,87
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	40	47,4	39,5	42,3	4,42
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	12,1	12,3	12,3	12,2	0,115
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0
Grasas y Aceites	mg/L	12,8	12,4	12,3	12,5	0,265
Compuestos de Fósforo						
Fosfatos	mg/L	1,9	1,8	1,9	1,86	0,057
Fósforo Total	mg/L	0,63	0,60	0,63	0,62	0,017
Compuestos de Nitrógeno						
Nitratos	mg/L	14,52	14,08	13,64	14,08	0,440
Nitritos	mg/L	29,7	29,7	29,7	29,7	0,0
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,81	0,80	0,80	0,80	0,005
Nitrógeno Total	mg/L	20,01	20,01	20,01	20,01	0,0
Iones						
Fluoruros	mg/L	0,16	0,16	0,17	0,16	0,006
Sulfatos	mg/L	21	21	22	21,3	0,577
Metales y Metaloides						
Aluminio (Al)	mg/L	0,032	0,031	0,032	0,031	0,0
Cobre (Cu)	mg/L	1,06	1,05	1,05	1,05	0,005

Hierro (Fe)	mg/L	6,68	6,65	6,68	6,67	0,017
Otros parámetros para Análisis y Reporte						
Color real	UPtCo	43	36	42	40,3	3,79
Conductividad	μS/cm	1,002	1,002	1,002	1,002	0,0
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	426	425	409	420	9,54
Dureza total	mg/L CaCO ₃	>50	>50	>50	>50	

RESOLUCION 0631 DEL 17 DE
MARZO DE 2015

“Cuando la carga másica antes del tratamiento es mayor a 125
kg/ día de DBO₅.” Artículo 6

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ'
Coliformes Termotolerantes						
Coliformes Totales	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0
E. Coli	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0

Parámetros medidos *in situ*

pH: 7,3 Temperatura: 19,7 °C Conductividad: 1,002 μS/cm

Turbiedad: 0,0 UNT Volumen de muestra recogido: 2.5 litros



MATRIZ DE LA MUESTRA: Agua Residual
TIPO DE MUESTRA: Simple
TOMADA POR: Luisa Sánchez - Fabián Vélez
HORA Y FECHA: 6:00 am – 8/06/2016
SITIO: Sistema Piloto – Unidad Experimental 2
NÚMERO DE MUESTRA: Muestra 11 – M11



FORMATO PARA ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL

Especie Vegetal: *Heliconia psittacorum* Tiempo: 120 horas Volumen de agua: 12,5 Litros

RESOLUCIÓN 0631 DEL 17 DE MARZO
DE 2015

“Actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los capítulos V y VI con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial.” Artículo 15

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ
		1	2	3		
Generales						
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	14	12	16,1	14	2,05
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	18,3	24,9	15,6	19,6	4,78
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	3,4	3,4	3,4	3,4	0,0
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0
Grasas y Aceites	mg/L	8,6	8,8	8,8	8,7	0,115
Compuestos de Fósforo						
Fosfatos	mg/L	0,80	0,82	0,82	0,81	0,011
Fósforo Total	mg/L	0,26	0,27	0,27	0,26	0,005
Compuestos de Nitrógeno						
Nitratos	mg/L	4,45	4,54	4,47	4,48	0,047
Nitritos	mg/L	9,9	9,9	9,9	9,9	0,0
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,36	0,35	0,37	0,36	0,010
Nitrógeno Total	mg/L	18,67	18,67	18,67	18,67	0,0
Iones						
Fluoruros	mg/L	0,14	0,14	0,14	0,14	0,0
Sulfatos	mg/L	16	16	15	15,6	0,577
Metales y Metaloides						
Aluminio (Al)	mg/L	0,023	0,022	0,022	0,022	0,0
Cobre (Cu)	mg/L	0,26	0,27	0,26	0,26	0,005

Hierro (Fe)	mg/L	1,64	1,64	1,64	1,64	0,0
Otros parámetros para Análisis y Reporte						
Color real	UPtCo	36	37	36	36,3	0,577
Conductividad	μS/cm	0,822	0,822	0,822	0,822	0,0
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	385	395	390	390	5,0
Dureza total	mg/L CaCO ₃	>50	>50	>50	>50	

RESOLUCION 0631 DEL 17 DE
MARZO DE 2015

“Cuando la carga másica antes del tratamiento es mayor a 125
kg/ día de DBO₅.” Artículo 6

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ'
Coliformes Termotolerantes						
Coliformes Totales	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0
E. Coli	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0

Parámetros medidos *in situ*

pH: 7,3 Temperatura: 19,7 °C Conductividad: 0,822 μS/cm

Turbiedad: 0,0 UNT Volumen de muestra recogido: 2,5 litros



MATRIZ DE LA MUESTRA: Agua Residual
TIPO DE MUESTRA: Simple
TOMADA POR: Luisa Sánchez - Fabián Vélez
HORA Y FECHA: 6:00 am – 08/06/2016
SITIO: Sistema Piloto – Unidad Experimental 3
NÚMERO DE MUESTRA: Muestra 12 – M12



FORMATO PARA ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL

Especie Vegetal: *Heliconia psittacorum* y *Costus spicatus* Tiempo: 48 horas Volumen de agua: 12,5 Litros

RESOLUCIÓN 0631 DEL 17 DE MARZO
DE 2015

“Actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los capítulos V y VI con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial.” Artículo 15

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ
		1	2	3		
Generales						
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	36,1	37,9	36	36,6	1,069
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	47,8	40	42,7	43,5	3,96
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	7,1	7,3	7,2	7,2	0,100
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0
Grasas y Aceites	mg/L	10,3	9,9	10,1	10,1	0,200
Compuestos de Fósforo						
Fosfatos	mg/L	1,06	1,06	1,06	1,06	0,0
Fósforo Total	mg/L	0,35	0,35	0,35	0,35	0,0
Compuestos de Nitrógeno						
Nitratos	mg/L	13,2	13,2	13,2	13,2	0,0
Nitritos	mg/L	16,5	16,5	16,5	16,5	0,0
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,60	0,61	0,60	0,60	0,005
Nitrógeno Total	mg/L	18,01	18,01	18,01	18,01	0,0
Iones						
Fluoruros	mg/L	0,19	0,19	0,18	0,19	0,005
Sulfatos	mg/L	18	18	17	18	0,00
Metales y Metaloides						
Aluminio (Al)	mg/L	0,028	0,028	0,029	0,028	0,00
Cobre (Cu)	mg/L	0,70	0,72	0,72	0,71	0,011

Hierro (Fe)	mg/L	4,9	4,9	4,9	4,9	0,0
Otros parámetros para Análisis y Reporte						
Color real	UPtCo	38	38	38	38	0,0
Conductividad	μS/cm	0,874	0,875	0,878	0,875	0,002
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	495	475	465	478,3	15,28
Dureza total	mg/L CaCO ₃	>50	>50	>50	>50	

RESOLUCION 0631 DEL 17 DE
MARZO DE 2015

“Cuando la carga másica antes del tratamiento es mayor a 125
kg/ día de DBO₅.” Artículo 6

Parámetro	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ'
Coliformes Termotolerantes						
Coliformes Totales	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0
E. Coli	NMP/100mL	>1100	>1100	>1100	>1100	0

Parámetros medidos *in situ*

pH: 7,3 Temperatura: 19,7 °C Conductividad: 0,875 μS/cm

Turbiedad: 0,0 UNT Volumen de muestra recogido: 2,5 litros

Apéndice B. Análisis de los sustratos utilizados. Mediciones por triplicado, promedio (\bar{x}) y desviación estándar (σ).



MATRIZ DE LA MUESTRA: Suelo
TIPO DE MUESTRA: Simple
TOMADA POR: Luisa Sánchez - Fabián Vélez
HORA Y FECHA: 2:45 pm – 08/ 07/ 2016
SITIO: Laboratorio de aguas



FORMATO PARA ANÁLISIS DE SUSTRATOS

Tiempo: 48 horas.

Parámetro	Blanco	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ
			1	2	3		
Hierro							
Arena gruesa	0,1	mg/L	3,00	3,20	3,13	3,11	0,10
Granito #3	0,1	mg/L	0,40	0,40	0,40	0,40	0,00
Grava gruesa	0,1	mg/L	0,37	0,37	0,36	0,37	0,01
Medio filtrante combinado	0,1	mg/L	4,32	4,35	4,37	4,35	0,03
Dureza							
Arena gruesa	0,1	mg/L	17	18	17	17,3	0,58
Granito #3	0,1	mg/L	110	113	114	112,3	2,08
Grava gruesa	0,1	mg/L	12	13	13	12,67	0,58
Medio filtrante combinado	0,1	mg/L	141,5	144	146	143,83	2,25



MATRIZ DE LA MUESTRA: Suelo
TIPO DE MUESTRA: Simple
TOMADA POR: Luisa Sánchez - Fabián Vélez
HORA Y FECHA: 2:45 pm – 11/ 07/ 2016
SITIO: Laboratorio de aguas



FORMATO PARA ANÁLISIS DE SUSTRATOS

Tiempo: 120 horas.

Parámetro	Blanco	Unidad	Mediciones			\bar{x}	σ'
			1	2	3		
Hierro							
Arena gruesa	0,1	mg/L	8,12	8,17	8,08	8,12	0,05
Granito #3	0,1	mg/L	0,56	0,60	0,60	0,59	0,02
Grava gruesa	0,1	mg/L	0,44	0,45	0,47	0,45	0,02
Medio filtrante combinado	0,1	mg/L	9,30	9,26	9,26	9,27	0,02
Dureza							
Arena gruesa	0,1	mg/L	28	31	31	30,00	1,73
Granito #3	0,1	mg/L	552,6	550,3	551,8	551,57	1,17
Grava gruesa	0,1	mg/L	36	32	34	34,00	2,00
Medio filtrante combinado	0,1	mg/L	582,4	581,9	585,80	583,37	2,12

Apéndice C. Registro fotográfico



Especies vegetales *Costus spicatus* (arriba) y *Heliconia psittacorum* (abajo) en el vivero de la UFPSO.



Paso a paso de la construcción del sistema piloto en el vivero de la UFPSO.



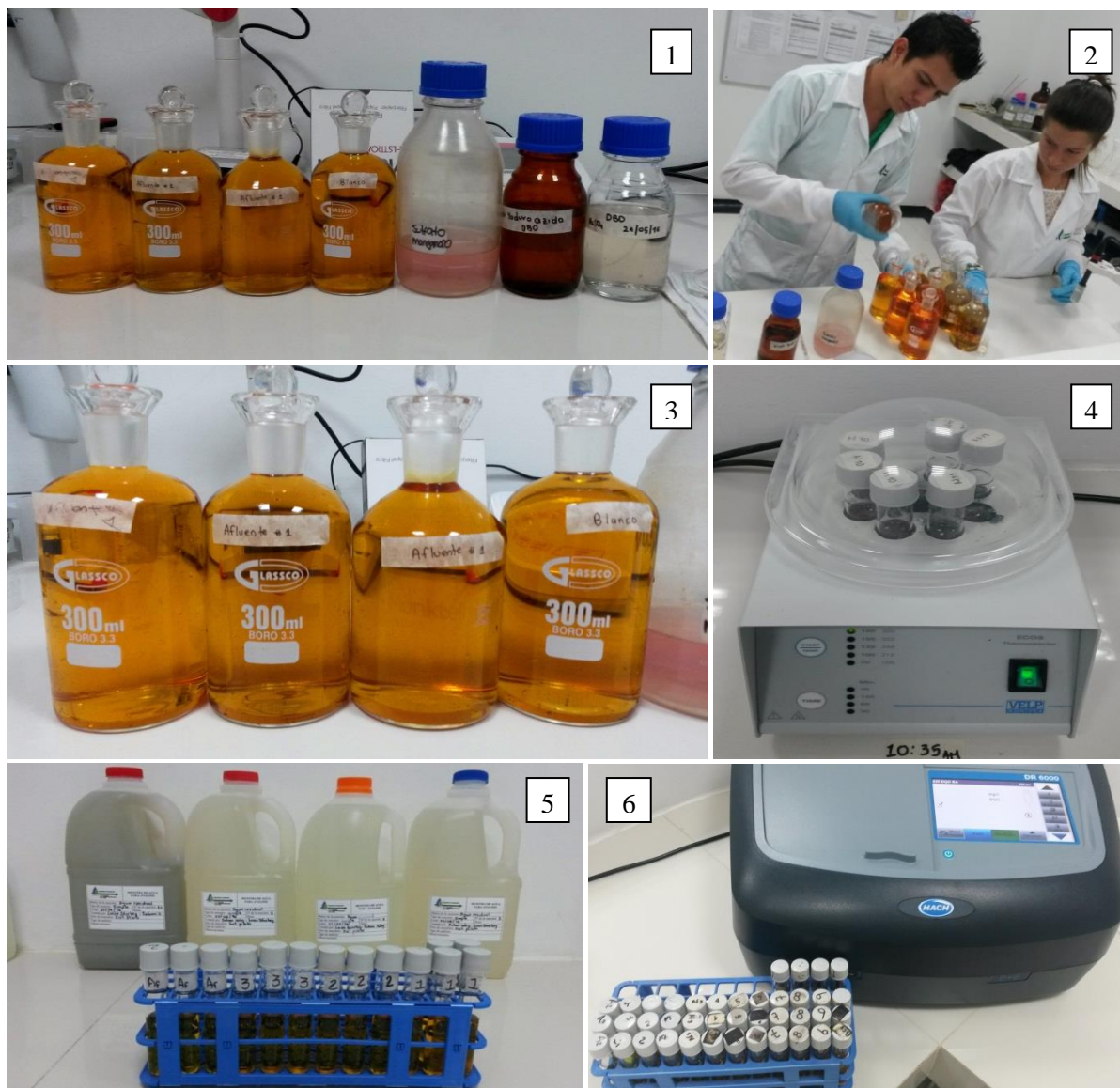
Transplante de las especies vegetales *Costus spicatus* y *Heliconia psittacorum* en las unidades experimentales.



Llenado del tanque aereo con agua residual, puesta en marcha y funcionamiento del sistema piloto en el vivero de la UFPSO.



Recolección de las muestras y análisis in situ en el tanque aéreo y unidades experimentales.



Análisis del afluente y efluentes para DBO_5 (1-3) y DQO (4-6), basados en el standard methods.



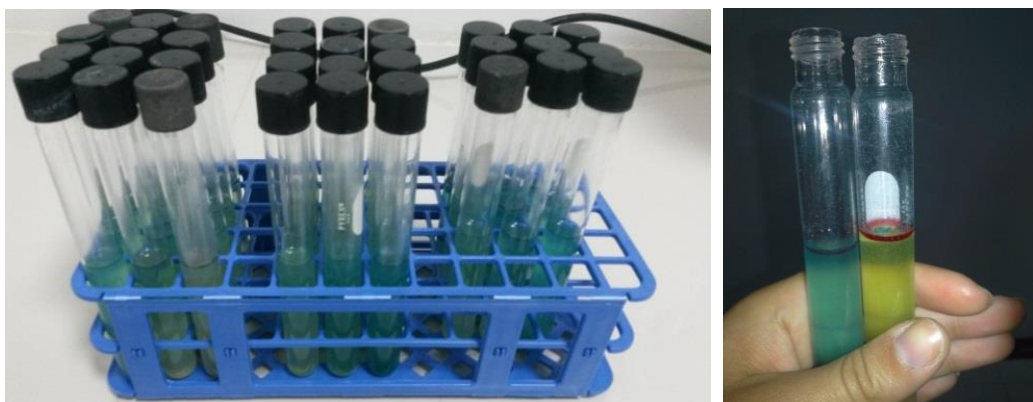
Análisis de las muestras para los parametros alcalinidad (izquierda) y dureza total (derecha).



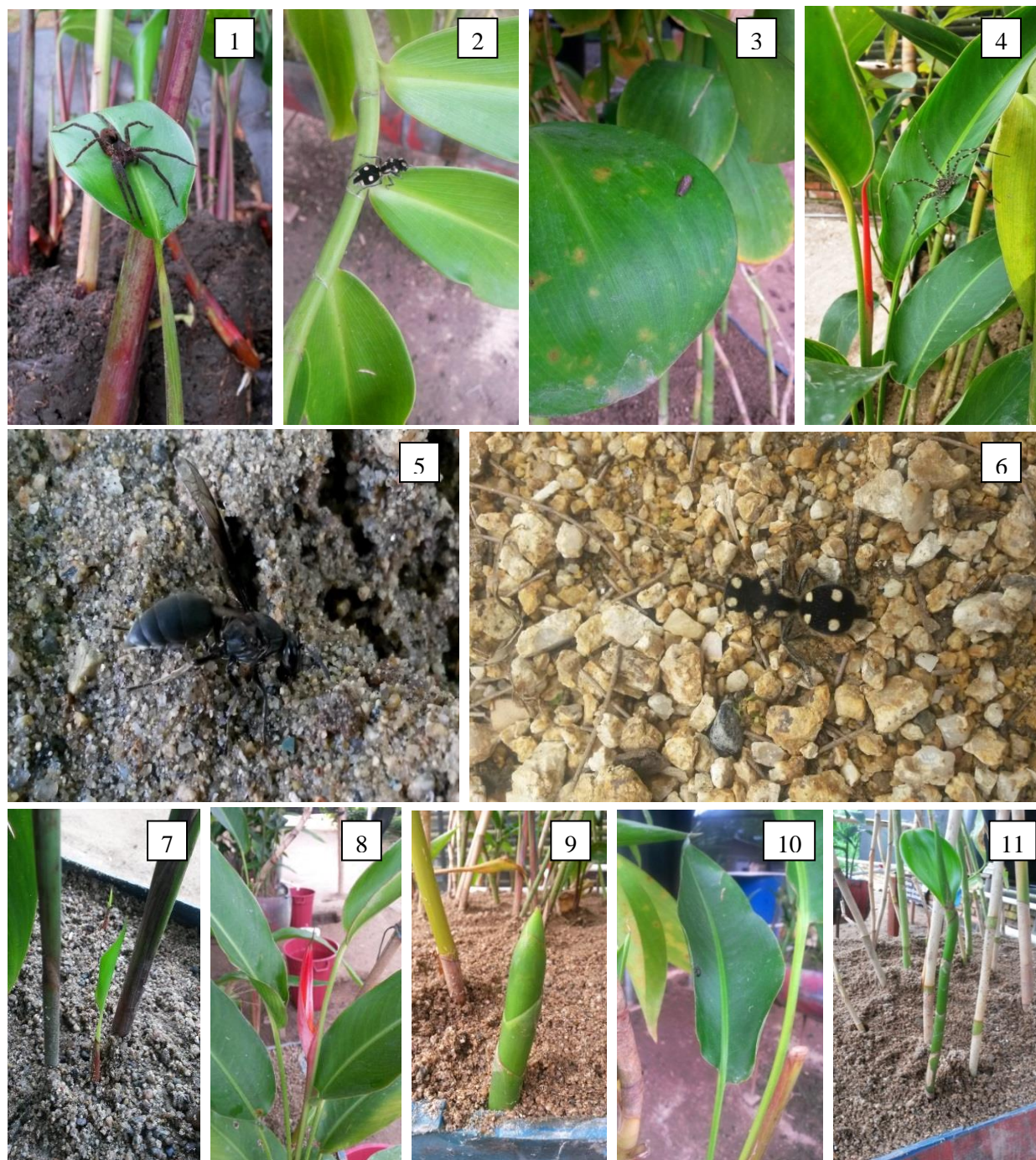
Análisis de sólidos suspendidos totales (arriba) y sólidos sedimentables (abajo) para las muestras del afluente y efluente.



Procedimiento de extracción de grasas y aceites a través del método de soxhlet (arriba) y análisis de iones y metales pesados (abajo).



Análisis microbiológicos: Coliformes totales (izquierda) y E. Coli (derecha).



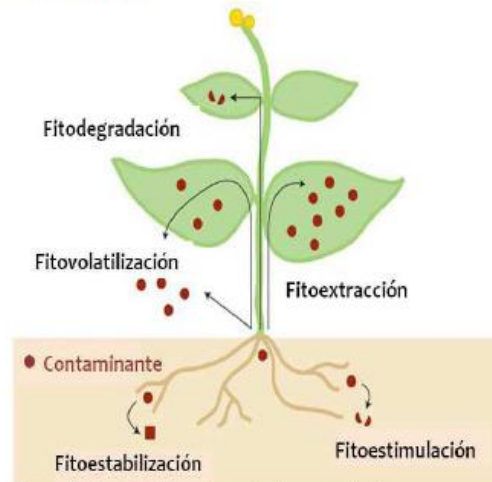
Microfauna encontrada en el sistema piloto (1-6) y seguimiento de la fisionomía y desarrollo de las especies plantadas (7-11).

Apéndice D. Folleto informativo para la socialización del proyecto (primera cara)

FITORREMEDIACIÓN, UNA TECNOLOGÍA QUE INVOLUCRA PLANTAS Y MICROORGANISMOS EN EL SANEAMIENTO AMBIENTAL.

FITORREMEDIACIÓN

La fitorremediación se define como el uso de plantas para eliminar, destruir o transformar contaminantes del suelo, agua y aire. En este proceso las plantas son seleccionadas principalmente por su potencial fisiológico, como en el caso de enzimas presentes para tolerar y asimilar sustancias tóxicas, por sus tasas de crecimiento, por la profundidad de sus raíces y su habilidad para bioacumular y/o degradar contaminantes.



Fuente: Pilión, 2005. Mecanismos de fitorremediación.

El crecimiento demográfico ha conllevado a la sobreexplotación de los recursos naturales, principalmente el agua para la realización de sus actividades y suplir sus necesidades diarias, generando así residuos líquidos que son vertidos a los sistemas de alcantarillado y muchas veces directamente a fuentes hídricas sin ningún tipo de tratamiento, contaminando el medio acuático y su ecosistema adyacente generando grandes impactos sanitarios, sociales, económicos y ambientales.

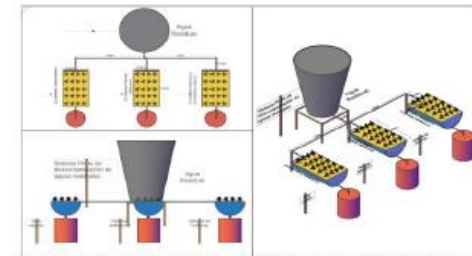


Se plantea un sistema de descontaminación de aguas residuales mediante fitorremediación empleando las especies *Costus spicatus* y *Heliconia psittacorum*, se determina la cantidad e identidad del contaminante que afecta al medio, posteriormente se cuantifica la disminución de estas sustancias después del tratamiento para conocer la eficiencia del sistema y así sugerir su aplicación a cuerpos hídricos más grandes como PTAR's y/o afluentes de ríos.



METODOLOGÍA: Para el desarrollo del sistema piloto se tiene en cuenta:

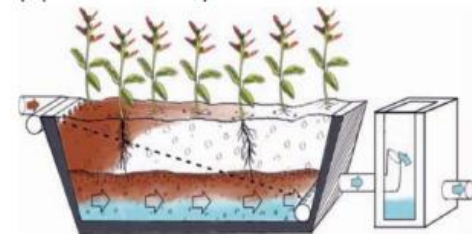
- Diseñar y construir el sistema piloto.
- Evaluar el nivel de contaminación del agua residual antes y después del tratamiento.
- Calcular los niveles de remoción para cada parámetro analizado del agua residual.
- Verificar la efectividad del sistema basado en el cumplimiento de la resolución 0631/15.



Fuente: Autor. Plano del sistema piloto de descontaminación.

¿QUÉ ESPECIES SE USARÁN?

Para la realización de este proyecto se empleará las especies *Costus spicatus* y *Heliconia psittacorum*; que tienen capacidad de acumular elementos inorgánicos, a niveles cien veces más altos que otras especies bajo las mismas condiciones ambientales (híper-acumuladoras).



Fuente: Salamanca, 2013. Elementos de un humedal artificial.

Apéndice D. Folleto informativo para la socialización del proyecto (segunda cara)

Clasificación	
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Zingiberales
Familia	Heliconiaceae
Genero	Heliconia
Especie	<i>Heliconia psittacorum</i> L. f.



Recientemente, estudios han evaluado el papel de la *Heliconia psittacorum* en la remediación de aguas residuales encontrando resultados positivos de hasta un 80% de remoción.

Clasificación	
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Zingiberales
Familia	Costaceae
Genero	Costus
Especie	<i>Costus spicatus</i>



No se encuentran antecedentes sobre esta planta; Se pretende estudiar la capacidad de la *Costus spicatus* para absorber metales pesados y sustancias inorgánicas presentes en aguas contaminadas.



Es importante llegar a aplicar este sistema porque se contribuye con el aporte de una nueva metodología para la descontaminación de fuentes hídricas, con posible aplicación en muchos sectores como las industrias, el sector domiciliario, sector energético y en todas las actividades que generen residuos líquidos que perjudican seriamente los afluentes.



Tecnologías Limpias

También contribuye con el crecimiento tecnológico y ahorro de recursos de una organización al no destinar sus recursos financieros en costosos tratamientos y sistemas de descontaminación. En síntesis, aplicar este sistema de fitorremediación es mucho más limpio, económico, con mejores resultados y más amigable con el medio.

"TÚ DEBES SER EL CAMBIO QUE DESEAS VER EN EL MUNDO" MAHATMA GANDHI

UN PROYECTO REALIZADO POR:



Universidad Francisco de Paula Santander - Ocaña
Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente
Ingeniería Ambiental

Diseño y evaluación de un sistema piloto para la descontaminación de aguas residuales generadas en la UFPSO, empleando las especies *Costus spicatus* y *Heliconia psittacorum*.

Estudiantes:

Luisa Fernanda Sánchez Gil
Yermis Fabián Vélez

Docente asesor:

Gustavo Elberto Epalza Sánchez



“No hay vida sin agua. El agua es un tesoro indispensable para toda actividad humana”

*Carta Europea del Agua, Estrasburgo
(6 de mayo de 1968).*