



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL

**FITORREMEDIACIÓN DE AGUAS MIELES DE Coffea
arabica UTILIZANDO MACRÓFITAS ACUÁTICAS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN O PROYECTO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTOR: IGOR ISMAEL NEIRA REIBAN

DIRECTOR: DR. SERGIO FERNANDO IGLESIAS ABAD PH. D.

CUENCA - ECUADOR

2021

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL

**FITORREMEDIACIÓN DE AGUAS MIELES DE Coffea
arabica UTILIZANDO MACRÓFITAS ACUÁTICAS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN O PROYECTO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTOR: IGOR ISMAEL NEIRA REIBAN

DIRECTOR: DR. SERGIO FERNANDO IGLESIAS ABAD PH. D.

CUENCA-ECUADOR

2021

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

Declaratoria de Autoría y Responsabilidad

Yo Igor Ismael Neira Reibán portador(a) de la cédula de ciudadanía N° **0106832868**. Declaro ser el autor de la obra: "FITORREMEDIACIÓN DE AGUAS MIELES DE *Coffea arabica* UTILIZANDO MACRÓFITAS ACUÁTICAS", sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, **28 de septiembre de 2021**

F: 

Igor Ismael Neira Reibán

C.I. 0106832868

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue aprobado y desarrollado por el señor **IGOR ISMAEL NEIRA REIBAN**, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several fluid, connected strokes, positioned above a horizontal dashed line.

Dr. Sergio Iglesias Abad. Ph. D.

DIRECTOR

AGRADECIMIENTO

A los docentes de la carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Católica de Cuenca, de manera especial al Dr. Sergio Iglesias Ph. D., director de la investigación por su apoyo y orientaciones estratégicas para la concreción de este trabajo

Al Ing. Carlos Matovelle M.Sc., por su soporte en el análisis de laboratorio y enseñanzas brindadas a lo largo de mis estudios.

A la Ing. Carla Jaramillo y Danilo Tayopanta directores de la fundación ATASIM por la favorable acogida en sus instalaciones y por su compromiso y responsabilidad socioambiental. De manera similar expreso mi agradecimiento al Ing. Gabriel Tello, técnico de la fundación ATASIM por su apoyo y amistad.

A los pequeños productores de café de la Amazonía

DEDICATORIA

Dedico este trabajo:

A mi padre Eisenhower, por su impulso constante,
por dar contenido a mi vida con sus valiosos consejos.

A mi querida madre, Miriam mi guía, mi ejemplo
mi más grande estrella

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTO	V
DEDICATORIA	VI
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VII
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABLAS	XII
LISTA DE ANEXOS	XII
RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XIV
CAPÍTULO I	- 1 -
1. INTRODUCCIÓN	- 1 -
1.1 ANTECEDENTES	- 1 -
1.2 PROBLEMA	- 2 -
1.3 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA	- 3 -
1.4 OBJETIVOS	- 4 -
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	- 4 -
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	- 4 -
1.5 HIPÓTESIS	- 4 -
CAPÍTULO II	- 5 -
2. REVISIÓN DE LITERATURA	- 5 -
2.1 GENERALIDADES DEL CAFETO	- 5 -
2.1.1 <i>Origen del café</i>	- 5 -
2.1.2 <i>Producción de café</i>	- 6 -
2.2 COSECHA DEL CAFÉ: RECOLECCIÓN MANUAL DE LOS FRUTOS	- 8 -
2.2.1 <i>Proceso de maduración de frutos</i>	- 8 -
2.2.2 <i>Calidad del café</i>	- 9 -
2.2.3 <i>Cosecha del café</i>	- 9 -
2.2.4 <i>Transporte del café</i>	- 10 -
2.3 RECEPCIÓN DEL CAFÉ	- 10 -
2.4 CLASIFICACIÓN DE FRUTOS DEL CAFÉ	- 11 -
2.4.1 <i>Separación por flotación</i>	- 11 -
2.4.2 <i>Clasificación del café por tamaño</i>	- 11 -
2.5 EXTRACCIÓN DE LA PULPA DEL CAFÉ	- 12 -
2.6 OPERACIÓN DE CLASIFICACIÓN DEL CAFÉ PERGAMINO	- 13 -
2.7 REMOCIÓN DEL MUCÍLAGO	- 13 -
2.7.1 <i>Eliminación mecánica del mucílago</i>	- 14 -
2.7.2 <i>Extracción del mucílago por fermentación</i>	- 15 -
2.8 LAVADO DEL CAFÉ	- 15 -
2.9 SECADO DE CAFÉ	- 16 -
2.9.1 <i>Naturalmente</i>	- 17 -
2.9.2 <i>En máquinas secadoras</i>	- 17 -
2.9.3 <i>A la vista</i>	- 18 -
2.9.4 <i>Con el diente</i>	- 18 -
2.9.5 <i>Determinación de humedad con navaja o cuchillo</i>	- 18 -
2.10 ALMACENAMIENTO DEL GRANO SECO	- 19 -
2.11 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS SUBPRODUCTOS DEL CAFÉ	- 20 -

2.11.1	La pulpa	- 20 -
2.11.2	El mucílago	- 21 -
2.11.3	Aguas mieles	- 22 -
2.11.4	La cascarilla	- 23 -
2.12	PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE AGUAS MIELES	- 23 -
2.13	DETERIORO AMBIENTAL DERIVADO DE DESECHOS DEL CAFÉ	- 26 -
2.14	FITORREMEDIACIÓN	- 31 -
2.14.1	Importancia y conceptos	- 32 -
2.14.2	<i>Eichhornia crassipes</i>	- 34 -
2.14.3	<i>Cyperus luzulae</i> (coquito)	- 35 -
2.14.4	<i>Eleocharis sp.</i> (Junco)	- 37 -
2.15	HUMEDALES ARTIFICIALES (HA)	- 38 -
2.15.1	Generalidades	- 38 -
2.15.2	Tipos de humedales	- 39 -
2.16	REGLAMENTOS DE TULAS PARA EL VERTIDO DE AGUAS RESIDUALES	- 41 -
CAPÍTULO III		- 43 -
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	- 43 -
3.1	ZONA DE ESTUDIO	- 43 -
3.2	MATERIALES	- 44 -
3.2.1	Materiales Físicos	- 44 -
3.2.2	Materiales químicos	- 45 -
3.2.3	Materiales biológicos	- 45 -
3.3	DESARROLLO METODOLÓGICO	- 45 -
3.3.1	Para cumplir el objetivo específico 1:	- 46 -
3.3.2	Para cumplir el objetivo específico 2:	- 49 -
3.3.3	Para cumplir el objetivo específico 3:	- 54 -
CAPÍTULO IV		- 56 -
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	- 56 -
4.1	DATOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO	- 56 -
4.2	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	- 60 -
4.3	DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO ₅)	- 62 -
4.4	SÓLIDOS TOTALES	- 65 -
4.5	PRESENCIA DE NITRATOS EN AGUAS MIELES DE CAFÉ	- 67 -
4.6.	PRESENCIA DE NITRITOS EN AGUAS MIELES DE CAFÉ	- 70 -
4.7	CONTENIDO DE FÓSFORO TOTAL	- 73 -
4.8	TURBIDEZ	- 76 -
4.9	ANÁLISIS DE PH EN AGUAS MIELES	- 78 -
4.10	RESULTADOS DE ADAPTACIÓN BASADO EN CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LAS MACRÓFITAS EN ESTUDIO	- 83 -
4.10.1	Número de raíces	- 83 -
4.10.2	Longitud de raíces	- 84 -
4.11	DISCUSIÓN ADICIONAL DE RESULTADOS	- 88 -
CAPÍTULO V		- 92 -
5.	CONCLUSIONES	- 92 -
CAPÍTULO VI		- 95 -
6.	RECOMENDACIONES	- 95 -
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		- 96 -
ANEXOS		- 106 -

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Coffea arabica</i> var. <i>Catucaí</i> , maduración y cosecha	- 9 -
Figura 2. Tipos de maduración de café	- 9 -
Figura 3. Tipos de café.....	- 11 -
Figura 4. Despulpadora fundación ATASIM	- 12 -
Figura 5. Desmucilagador y mucílago obtenido del beneficio del fruto.....	- 13 -
Figura 6. Desmucilagador mecánico.....	- 14 -
Figura 7. Limpieza del café fermentado	- 16 -
Figura 8. Remoción de humedad del café.....	- 18 -
Figura 9. Análisis del contenido de humedad en la semilla de café	- 19 -
Figura 10. Acopio de granos.....	- 20 -
Figura 11. Pulpa originada del lavado de café	- 21 -
Figura 12. Estructura anatómica de <i>Eichhornia crassipes</i>	- 34 -
Figura 13. <i>Cyperus luzulae</i>	- 36 -
Figura 14. <i>Eleocharis</i> sp. (<i>Junco</i>).....	- 38 -
Figura 15. HFS con plantas acuáticas flotantes	- 39 -
Figura 16. HFS con plantas sumergidas	- 40 -
Figura 17. HFSSH	- 41 -
Figura 18. HFSSV	- 41 -
Figura 19. Zona de estudio.....	- 44 -
Figura 20. Adecuación de construcción para el estudio	- 46 -
Figura 21. Nivelación del terreno.....	- 46 -
Figura 22. División de tanques de polietileno	- 47 -
Figura 23. Implementación de subsistemas	- 47 -
Figura 24. Conexiones entre sistemas	- 47 -
Figura 25. Subsistemas conectados a tanque receptor de 1000 l.....	- 48 -
Figura 26. Colocación de grava y arena.....	- 49 -
Figura 27. Lavado de grava.....	- 49 -
Figura 28. Colocación de agua miel con 72 plantas <i>Eichhornia crassipes</i>	- 50 -
Figura 29. Colocación de grava y arena y 72 plantas <i>Eleocharis</i> sp (<i>Junco</i>)	- 50 -
Figura 30. Recolección e Identificación de especies: <i>Cyperus luzulae</i> y <i>Eleocharis</i> sp.	- 51 -
Figura 31. Recolección y traslado de <i>Eichhornia crassipes</i> (<i>Jacinto de agua</i>).....	- 51 -
Figura 32. Planta de tratamiento	- 52 -
Figura 33. Muestras de laboratorio.....	- 54 -
Figura 34. Toma de datos pH.....	- 54 -
Figura 35. Instrumentos utilizados para la toma de datos en plantas macrófitas	- 55 -
Figura 36. DQO en aguas mieles en <i>Coffea arabica</i> utilizando macrófitas con respecto al tiempo de retención.....	- 62 -
Figura 37. Demanda Biológica de Oxígeno en aguas mieles de <i>Coffea arabica</i> utilizando macrófitas acuáticas con respecto al tiempo de retención	- 64 -
Figura 38. Sólidos totales en aguas mieles de <i>Coffea arabica</i> utilizando macrófitas acuáticas con respecto al tiempo de retención.	- 67 -
Figura 39. Nitratos en aguas mieles de <i>Coffea arabica</i> utilizando macrófitas con respecto al tiempo de retención.....	- 70 -
Figura 40. Nitritos en aguas mieles de <i>Coffea arabica</i> utilizando macrófitas con respecto al tiempo de retención.....	- 73 -
Figura 41. Fósforo total, en aguas mieles de <i>Coffea arabica</i> utilizando macrófitas con respecto al tiempo de retención.....	- 75 -
Figura 42. Turbidez en NTU en aguas mieles de <i>Coffea arabica</i> utilizando macrófitas con respecto al tiempo de retención	- 78 -
Figura 43. pH en aguas mieles de <i>Coffea arabica</i> utilizando macrófitas con respecto al tiempo de retención	- 82 -

Figura 44. Número de raíces de las especies macrófitas acuáticas evaluadas en aguas mieles de *Coffea arabica*. - 84 -

Figura 45. Datos de características morfológicas de especies utilizando macrófitas acuáticas evaluadas en aguas mieles de *Coffea arabica* obtenidos al final del experimento - 85 -

Figura 46. izq.) *Eleocharis sp.* al inicio. der.) *Eleocharis sp.* al final del experimento..... - 86 -

Figura 47. Izq.) *Cyperus luzulae* al inicio. Der) *Cyperus luzulae.* al final del experimento..... - 86 -

Figura 48. Izq.) *Eichhornia crassipes* inicio. Dch) *Eichhornia crassipes.* fin del experimento.... - 87 -

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Constitución química, pulpa de café. _____	- 21 -
Tabla 2. Mucílago: Constitución química _____	- 22 -
Tabla 3. Beneficios y limitaciones de la fitorremediación _____	- 32 -
Tabla 4. Clasificación <i>Eichhornia crassipes</i> _____	- 35 -
Tabla 5. Constitución <i>Eichhornia crassipes</i> _____	- 35 -
Tabla 6. Descripción taxonómica de <i>Cyperus Luzulae</i> _____	- 36 -
Tabla 7. Características <i>Eleocharis sp (junco)</i> _____	- 37 -
Tabla 8. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce _____	- 42 -
Tabla 9. Tratamientos en estudio _____	- 45 -
Tabla 10. Volumen de agua miel utilizado en el experimento _____	- 52 -
Tabla 11. Resultados de parámetros físico químico de aguas mieles Inicial _____	- 56 -
Tabla 12. Resultados de parámetros físico químico de aguas mieles (cinco días) _____	- 56 -
Tabla 13. Resultados de parámetros físico químico de aguas mieles. 14 días _____	- 57 -
Tabla 14. Resultados de parámetros físico químico de aguas mieles. 19 días _____	- 57 -
Tabla 15. Resultados de parámetros pH de aguas mieles 19 días _____	- 57 -
Tabla 16. Resultados del análisis de varianza y comparación múltiple de medias (MDS) al 5%. Muestra 1, a los cinco días _____	- 58 -
Tabla 17. Resultados del análisis de varianza. Prueba MDS al 5%. Muestra 2 a los 14 días. _	- 59 -
Tabla 18. Resultados del análisis de varianza y comparación múltiple de medias. Prueba MDS, al 5%. Muestra 3 a los 19 días. _____	- 59 -
Tabla 19. Prueba media de Tukey al 5%. Para DQO en aguas mieles, <i>Coffea arabica</i> utilizando macrófitas con respecto al tiempo de retención. _____	- 60 -
Tabla 20. Prueba media de Tukey al 5% para Demanda Biológica Oxígeno en aguas mieles de <i>Coffea arabica</i> utilizando macrófitas con respecto al tiempo de retención. _____	- 63 -
Tabla 21. Tukey al 5%, para sólidos totales en aguas mieles de <i>Coffea arabica</i> utilizando macrófitas acuáticas con respecto al tiempo de retención. _____	- 66 -
Tabla 22. Prueba de media (Tukey 5%) para Nitratos en aguas en aguas mieles de <i>Coffea arabica</i> utilizando macrófitas respecto al tiempo de retención. _____	- 68 -
Tabla 23. Prueba de Tukey al 5% para nitritos en aguas mieles de <i>Coffea arabica</i> utilizando macrófitas respecto al tiempo de retención _____	- 71 -
Tabla 24. Tukey al 5%, para la variable fósforo total en aguas mieles de <i>Coffea arabica</i> utilizando macrófitas acuáticas. _____	- 74 -
Tabla 25. Prueba Tukey al 5%, turbidez en aguas mieles de <i>Coffea arabica</i> utilizando macrófitas acuáticas. _____	- 77 -
Tabla 26. ADEVA para pH de aguas mieles (<i>Coffea arabica</i>) con macrófitas acuáticas. _____	- 79 -
Tabla 27. Prueba de Tuckey al 5%, para pH en aguas mieles de <i>Coffea arabica</i> utilizando macrófitas acuáticas. _____	- 79 -
Tabla 28. Prueba de Tukey al 5% para el valor de pH de aguas mieles a través del tiempo ____	- 80 -
Tabla 29. ADEVA para la variable número de raíces en aguas mieles de <i>Coffea arabica</i> utilizando macrófitas acuáticas. _____	- 83 -
Tabla 30. Análisis de la varianza (ADEVA) longitud de raíces en cm en aguas mieles de <i>Coffea</i> <i>arabica</i> utilizando macrófitas acuáticas. _____	- 84 -

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Cálculo volúmenes sustrato _____	- 106 -
--	---------

RESUMEN

En el beneficio del café se genera grandes volúmenes de aguas mieles con alto contenido de materia orgánica, ocasionando impactos negativos al ambiente. Es por ello que el objetivo del presente trabajo fue evaluar la eficiencia de la fitorremediación en el tratamiento de aguas mieles del café empleando tres especies macrófitas, implementando un sistema piloto de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal. Analizando el efecto de *Eichhornia crassipes*, *Cyperus luzulae* y *Eleocharis sp.*, para la remoción de los parámetros físico químicos contenidos en aguas mieles. El estudio se realizó en la fundación ATASIM, parroquia San Isidro del cantón Morona, que brinda el servicio del beneficio húmedo del café a los pequeños productores. Se empleó la investigación cuantitativa de tipo experimental de alcance exploratorio, las variables analizadas fueron tres macrófitas acuáticas *Cyperus luzulae* y *Eleocharis sp* con sustrato y *Eichhornia crassipes* sin sustrato, frente a un testigo (con sustrato) y tres tiempos de remoción (5, 14 y 19 días). Al final del experimento, el tratamiento (T₂) *Eleocharis sp.*, logró mayor eficiencia cumpliendo con los límites permisibles para los parámetros físico-químicos: fósforo, nitratos, nitritos, sólidos totales, turbidez y pH, posiblemente debido al mayor número de raicillas, tamaño de raíces y nuevos tallos, factores morfológicos que contribuyeron a conservar ambientes aeróbicos / anaeróbicos en la zona radicular, apoyando a la disminución de sustancias tóxicas.

Palabras clave: fitorremediación, aguas mieles, *Eleocharis sp*, *Eichhornia crassipes*, *Cyperus luzulae*

ABSTRACT

In the processing of coffee, large volumes of honey water are generated with a high content of organic matter, causing negative impacts on the environment. That is why the objective of this work was to evaluate the efficiency of phytoremediation in the treatment of coffee honey water using three macrophyte species, through the design and implementation of a pilot system of constructed wetlands with the horizontal subsurface flow and the analysis of the effect of *Eichhornia crassipes*, *Cyperus luzulae*, and *Eleocharis sp.* in the removal of physical and chemical parameters contained in honey water. The study was conducted at the ATASIM foundation, San Isidro parish, Morona canton, that provides the service of wet coffee processing to small producers. Quantitative research and the experimental method were used, the variables analyzed were three aquatic macrophytes *Cyperus luzulae* and *Eleocharis sp.* with substrate and *Eichhornia crassipes* without substrate, versus a control (with substrate) and three removal times (5, 14, and 19 days). At the end of the experiment, the treatment (T2) *Eleocharis sp.* achieved higher efficiency complying with the permissible limits for the physicochemical parameters: phosphorus, nitrates, nitrites, total solids, turbidity, and pH, possibly due to the greater number of rootlets, root size, and new stems, morphological factors that contributed to maintaining aerobic/ anaerobic conditions in the root zone, favoring pollutant purification processes.

KEYWORDS: phytoremediation, honey water, *Eleocharis sp.*, *Eichhornia crassipes*, *Cyperus luzula*

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El café es el segundo rubro con importancia económica luego del petróleo, en el ámbito mundial 125 millones de individuos se benefician del cultivo de Coffea, entre estos aproximadamente 25 millones los pequeños caficultores. Este cultivo se planta en zonas tropicales y subtropicales especialmente en países del sur. La exportación de café genera ingresos sustanciales a los países en donde se cultivan y es una actividad agrícola que genera empleo (Cardona, 2019).

Bajo este contexto, en la última década se ha incrementado significativamente la industria del café, debido a que esta bebida es la más popular y consumida por millones de personas a nivel mundial por su aroma, sabor y propiedades estimulantes debido a su contenido en cafeína (Díaz, et. al 2017). Por tanto, la industria del café molido es la responsable de la producción de residuos, generando en todo el mundo alrededor de 6.000.000 de toneladas/año de residuos, siendo indispensable la reutilización de estos y la aplicación de técnicas de mitigación o remediación por ser el café un producto que tiene importantes impactos ambientales pues los subproductos derivados de este como: aguas mieles y la cascarilla cuando no son tratados previamente causa impactos en los cuerpos receptores (agua y suelo) y también tiene importancia económica por los ingresos económicos que se obtienen de la venta de este producto (Mussatto, Ballesteros, Martins y Teixeira, 2011).

La demanda creciente de café lavado requiere la realización de un proceso denominado “beneficiado de café en húmedo”, que consiste en la utilización de grandes volúmenes de agua, los mismos que al ser vertidos directamente al suelo o a cursos de agua provocan contaminación. Palacios (2009) señala que para la producción de un quintal de grano limpio se emplean entre 2000 y 3000 litros de agua, estimándose un volumen de descarga de agua miel similar al suelo o fuentes de agua ocasionando una huella hídrica.

Las aguas derivadas del proceso de lavado del café perjudiciales para el ambiente, son las provenientes de la extracción de la pulpa y del mucílago del café, conocidas como aguas mieles, caracterizadas porque contienen una alta carga contaminante química, que

está, en relación directa con la estructura física y química de estas partes de fruto, sustancias que confieren corpúsculos y elementos en el lavado por agitación con agua fresca, originado de los compuestos de carbono procedentes del agua utilizada en los dos lavados y “con alrededor en términos de DQO de 43,615 mg OZ/litro, equivalente a 6 Kg de DQO/quintal oro” (Figueroa, Pérez y Godínez, 2014).

Al derramar los vertidos de beneficio húmedo del café sobre aguas superficiales se contamina este recurso, afectando al agua de tres maneras a saber: a) disminuyendo el pH de del agua natural a 2.5, por la presencia de sustancias ácidas orgánicas (“ácido acético, butírico y propiónico”, entre otros) producidos durante la etapa anaeróbica como parte del proceso de descomposición de sustancias biológicas (MO). b) agotando el oxígeno diluido (OD) en este recurso, por el abastecimiento de este elemento por microorganismos encargados de la desintegración de MO. c) aumentando la turbidez del agua, por la presencia de polifenoles y de sólidos suspendidos (Somayo, Borrayo, Pérez, Morataya y Montenegro, 2014).

1.2 Problema

En el cantón Morona existen productores que cultivan el café, rubro que permite la generación de ingresos. Las plantaciones de café fueron dinamizadas por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), institución que se centró en la distribución de plantas olvidando la asistencia técnica y descuidado el manejo cosecha y postcosecha del cultivo, lo que ocasiona grandes pérdidas económicas.

Ante esta problemática socioeconómica la Fundación ATASIM con financiamiento extranjero inició sus actividades hace dos años brindando asistencia técnica alternativa bajo el enfoque de agricultura orgánica en la cadena del café, así como, el fortalecimiento organizativo. En este contexto la Fundación ATASIM con el fin de aportar al mejoramiento de los ingresos de caficultores de San Isidro del cantón Morona, pone a disposición de estos, un centro de acopio y manejo postcosecha en busca de la obtención de un café gourmet (alcanzado desde el beneficio húmedo del café) para dar valor agregado con fines de exportación para lograr un incremento en el rédito económico, para las familias dedicadas a este cultivo.

Sin embargo, del beneficio húmedo del café como parte del manejo postcosecha, genera un conflicto de contenido ambiental (Montero y Sandí, 2009). Durante el lavado del café se producen tres tipos de contaminantes: aguas provenientes de la extracción de la

pulpa, de la limpieza (agua miel) y de las sustancias fibrosas del mesocarpio de la baya del café (pulpa). Molina y Villatoro (2006) señalan que afectan las características física químicas y biológicas de los cuerpos receptores cuando son vertidos directamente a estos sistemas. Las aguas mieles contienen un pH ácido y contaminación orgánica alta (DQO) (DBO_5) causando impactos negativos afectando a la flora y micro fauna de la Amazonía (Espinoza y Monserrat, 2013).

Con el fin de solucionar la problemática ambiental derivada de aguas mieles se pretende utilizar la fitorremediación como tecnología alternativa para la descontaminación de estas aguas y devolverlas a su curso natural basadas en la utilización de plantas para restituir medios contaminados, como: agua, suelo, y aire (Nuñez, Vong, Borges y Olguín, 2004).

1.3 Justificación Teórica

Para contribuir a la reparación del problema ambiental derivado de las efluentes provenientes de la agroindustria del café del centro de acopio de la fundación ATASIM, que afecta al suelo y fuentes hídricas, se utilizó la fitorremediación descrita como tecnología alternativa para descontaminar estas aguas y caracterizada por Arias, Betancur, Gómez, Salazar y Hernández (2010) a manera de técnica de limpieza pasiva y estética, que utiliza la aptitud de las plantas y la energía solar para la remoción de contaminantes presentes en el ambiente. En este sentido, los vegetales funcionan como carnada o tamiz biológico, las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar los contaminantes a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos.

De acuerdo con lo anterior Delgadillo, González, García, Villagómez y Sandoval (2011) pág. 507, describen a la fitorremediación como *“un conjunto de tecnologías que reducen in situ o ex situ la concentración de diversos compuestos a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas”*.

Varios estudios señalan que la concentración de sustancias orgánicas contaminantes en el agua empleada en la fase húmeda del café, dependen del método o manejo que se otorgue a ésta, antes de ser vertida en un curso hídrico siendo necesario dar un tratamiento previo, por tanto, se justifica la investigación desde el punto de vista ambiental (Espinoza y Monserrat, 2013). Así, resultados de estudios posicionan el uso de plantas en sistemas hidropónicos, los cuales han disminuido significativamente la contaminación expresándose en indicadores como pH, DBO_5 , DQO, sólidos suspendidos totales, fosfatos, nitratos,

nitritos, temperatura y turbidez, parámetros que cumplen con los límites permisibles (Azabache, Ruiz, Rodríguez y Díaz, 2014).

Los resultados obtenidos servirán para devolver al curso natural, el agua miel dentro los límites permisibles de los parámetros físico químicos (fósforo, nitratos, nitritos, sólidos totales, turbidez y pH), sin afectar el ambiente y contribuyendo a la obtención de certificación orgánica del café para la fundación ATASIM que permita posicionarse en el comercio justo en el ámbito internacional, al tiempo que beneficiará a los pequeños productores y productoras de la parroquia San Isidro, quienes dependen fundamentalmente del ingreso económico derivado de la venta del café.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de la fitorremediación en el tratamiento de aguas mieles del café empleando tres especies macrófitas acuáticas.

1.4.2 Objetivos específicos

1.4.2.1 Implementar un sistema piloto de humedales artificiales para el tratamiento de aguas mieles.

1.4.2.2 Analizar el efecto del *Eichhornia crassipes* (Jacinto de Agua), *Cyperus luzulae* (coquito) y *Eleocharis sp.* (junco) en la remoción de contaminantes: DQO, DBO₅, ST, nitratos, nitritos, fósforo total, turbidez y pH, presentes en las aguas mieles de *Coffea arabica*.

1.4.2.3 Analizar la adaptación de especies de macrófitas al sustrato, a través de la medida de longitud y número de raíces.

1.5 Hipótesis

Al menos uno de los tratamientos de estudio logra que se cumpla uno de los parámetros físicos y químicos medidos de acuerdo a la normativa ambiental vigente.

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Generalidades del cafeto

Las distintas variedades de café, son consideradas como el motor económico de varios países del trópico y se constituye después del agua como la bebida más importante en el ámbito mundial.

La caficultura en Ecuador tiene relevancia social y ambiental. El café genera ingresos en los diversas partes de la cadena (productor, acopio, transporte y comercialización) aportando con la generación de divisas favoreciendo la dinamización de la economía rural en los territorios en los que se produce este cultivo. La importancia del café en Ecuador se basa en que se cultiva en diferentes tipos de suelos, de forma ecológica en sistemas agroforestales contribuyendo a la preservación del material genético vegetal, a la absorción de carbono y a la estabilidad hídrica (Fórum Cultural del Café, 2020).

Los desechos del fruto del café, constituyen aproximadamente el 80% de su peso y no son aprovechados ni valorados comercialmente, generalmente son descargados en fuentes de agua y en suelos provocando olores desagradables y contaminación, afectando significativamente la vida acuática y terrestre de los sistemas en los que son depositados (Espinoza y Monserrat, 2013).

2.1.1 Origen del café

Los primeros en descubrir las propiedades benéficas del café fueron los árabes, así como, las facultades mercantiles del mismo mediante el desarrollo del proceso productivo del cultivo pretendiendo que el café no se expanda al resto del mundo (Figuerola et al. 2014).

Sin embargo, su fama se extendería desde Arabia siendo Yemen el lugar de relevancia del cultivo del café y desde allí su expansión a la sociedad musulmana. Gamarra (2008) declaró que el café se distribuyó en Egipto, África, Persia y Turquía.

Según Figuerola et al. (2014) en 1645 se expandió el consumo de café en Europa, mientras que en los países Sudamericanos las plantas de café se cultivaron en Colombia en 1732 por Jesuitas españoles y a inicios del siglo XVIII países como Bolivia, Ecuador, Perú y Venezuela iniciaron la producción de café con propósitos de comercialización.

El café en Ecuador inicia su producción en 1800 plantándose diferentes variedades de café: variedad típica y arabica; luego de un siglo fue introducido el café robusta al país, producción que empezó en 1951 en la demarcación de los Ríos, específicamente en el cantón Quevedo (Fórum Cultural del Café, 2020).

2.1.2 Producción de café

El proceso productivo del café según Sanchez, Bueno y Jara (2018) se describe a continuación:

Germinación y siembra: Se siembran las semillas en un almacigo, la germinación ocurre después de 45-50 días, luego de 15 días se trasplantan en bolsas negras. Entre 150-180 días las plántulas se trasplantan al campo para la implantación del cultivo.

Fertilización: la fertilización es una práctica cultural que incluye la dotación de abono orgánico o fertilizante al momento de la siembra y posteriormente según las demandas nutricionales de la plantación de café.

Manejo integrado de plagas y enfermedades: existen diferentes técnicas para el manejo de insectos, hongos, bacterias, virus y más, clasificadas en: biológicas, mecánicas, químicas y culturales cuya aplicación en conjunto se conoce con el nombre de manejo integrado. Estas técnicas son utilizadas con el fin de reducir y prevenir el ataque de insectos, hongos y bacterias que afectan la calidad del fruto del café y minimizan impactos ambientales negativos.

Floración: Luego del trasplante del café al sitio definitivo, la floración acontece a los 540-600 días y la fructificación ocurre 270 días después de la floración.

Sánchez, Bueno, y Jara, 2018 explicitan las labores de cosecha y manejo postcosecha del café, que se describen a continuación:

Recolección y cosecha: los frutos son cosechados cuando la cereza está madura mediante el pipeteo, es decir, la extracción manual de cada grano de café.

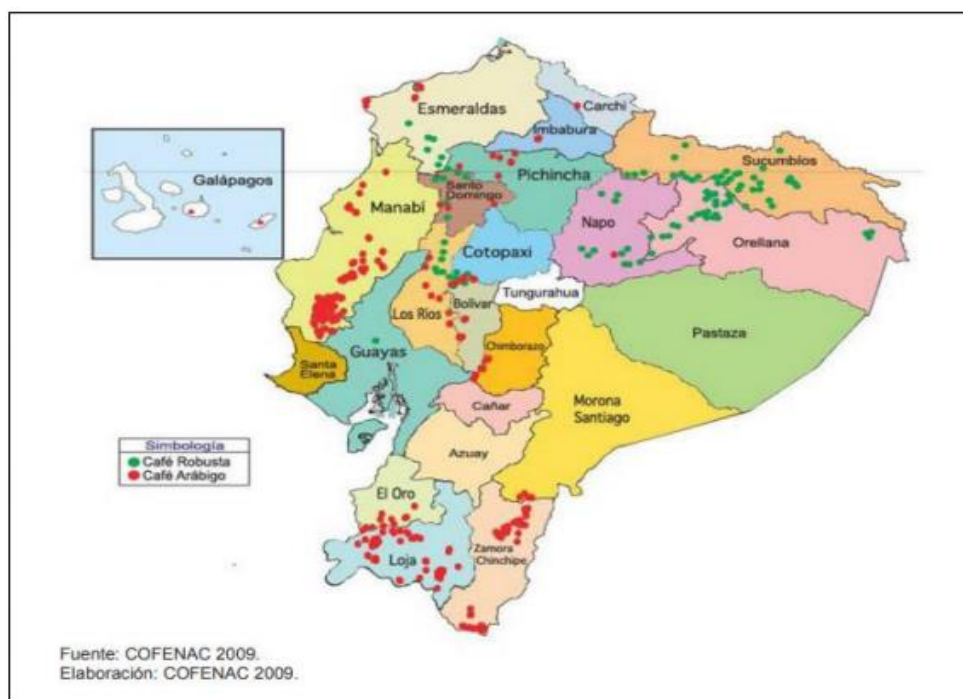
Despulpado: con el fin de remover la cereza del café, los caficultores utilizan una máquina despulpadora la misma que requiere de gran cantidad de agua para lograr este objetivo, además algunos equipos permiten seleccionar los granos según tamaño y peso.

Fermentación: es un proceso catabólico y anaeróbico usado generalmente para descomponer el mucílago del café, el tiempo estimado para la fermentación en este tipo de producto es de 18-24 horas.

Lavado y eliminación de mucílago: con la finalidad de eliminar el mucílago obtenido del proceso anterior se realiza el lavado de este.

Secado: esta fase se basa en disminuir la humedad de la semilla de café para lo cual se lo coloca en tendales expuestos al sol o bajo invernaderos o también ciertos productores utilizan hornos para reducir la humedad hasta el 12%, considerando este porcentaje como la humedad requerida para la venta.

Trilla: consiste en quitar el pergamino para que el grano quede completamente limpio y listo para su clasificación según peso y tamaño.



Mapa 1. Zonas cafetaleras por provincias en Ecuador.
Fuente: (Pozo, 2014)

El café en el Ecuador tiene importancia económica y cuenta con una superficie de 199.215 ha cultivadas, de las cuales el 68% está ocupada por la especie *arabica* y el 32% de café *canephora*. En nuestro país se cultiva en 23 provincias constituyendo una fuente principal de ingreso para varios productores. *Coffea arabica* es conocida generalmente como arábigo y es de calidad, las principales provincias que tienen la aptitud para este tipo de café son: Manabí y Loja. Mientras que *Coffea canephora* descrita como robusta se desarrolla principalmente en Sucumbíos y Orellana (Venegas, Orellana y Pérez, 2018).

2.2 Cosecha del café: Recolección manual de los frutos

La recolección se efectúa a partir del tercer o cuarto año desde el trasplante. Se recogen solamente las cerezas que están ya maduras, para garantizar la calidad. La cosecha se realiza desde agosto hasta marzo, y está en función del piso altitudinal en el que se cultiva este producto. Normalmente el café plantado en sectores de poca altura madura más pronto, comparado con el café sembrado en terrenos altos por efecto de factores ambientales (Rojo y Perez, 2014).

La cosecha del café es diferenciada según el piso altitudinal, así en zonas inferiores a 1000 ms.n.m. generalmente la cosecha se efectúa en los meses de septiembre a diciembre; en zonas intermedias (1000 a 1400 ms.n.m.) se realiza de noviembre a enero. En este mismo sentido en sitios localizados sobre los 1400 ms.n.m. la recolección se da desde enero hasta abril. Desde el inicio de la cosecha los caficultores realizan cuatro tipos de selección según la variedad de café, descartándose en dos de estos los frutos que presentan problemas de calidad, es decir, al inicio y al final de la cosecha mientras que las dos cosechas intermedias se recolecta el grano maduro (Leal y Morales, 1991).

La cosecha deberá ser efectuada por técnicos y personal con experiencia y conocimiento. Al iniciar la cosecha se recomienda colocar material debajo de los cafetos, con el propósito de proteger las cerezas que caen, es necesario efectuar cosecha selectiva (pipeteo) descartando frutos dañados en mal estado, definir procedimientos apropiados para la gestión y el tratamiento de subproductos derivados la cosecha, iniciar el manejo postcosecha rápidamente evitando el almacenamiento del café sin tratar (Ramirez, 2010).

2.2.1 Proceso de maduración de frutos

Somayo et al. (2014) postulan que durante la madurez de los frutos de café suceden cambios, que se enumeran a continuación:

- Deterioro del pigmento verde de las plantas.
- Síntetización de pigmentos verdes y liposolubles (carotenos como: licopeno, luteína, etc.).
- Disminución de componentes fénicos
- Incremento de sustancias volátiles (fragancia típica).

En el marco de las observaciones antes mencionadas, los frutos son de calidad logrando su punto de madurez adecuado. Figura 1.



Figura 1. *Coffea arabica* var. Catucaí, maduración y cosecha

2.2.2 Calidad del café

Las características de la cereza de *Coffea arabica* varía según su estado de maduración en función del tiempo, observándose cambios de coloración conforme transcurre éste y la coloración depende del grado y la cantidad de luz irradiada por el área del grano, así como de la zona de la luz visible (Herrera, Torres, Tascón y Montoya, 2011).

Grado de madurez del café		
Cereza "Verde cele"	Fruto " Verde Sazón"	Fruto "Maduro"
La semilla presenta mal formaciones con tonalidades negras. Presenta una fina capa de tonalidad plata pegada y numerosos frutos. Cuando es tostado el café, muestra un color amarillo y moteado y el grano es liso	El café pergamino no se distingue si procede de una baya madura. La capa de color plateada, se muestra adherida en partes al grano. Luego del proceso del tostado, se muestra llano o estriado, en diferentes partes. La tonalidad no es homogénea.	La semilla cuando está madura presenta un color verde homogéneo. La membrana argentada se separa sin esfuerzo. Una vez tostado el café muestra un color negro y arrugado cuando proviene de sitios altos; en cambio sí provienen de áreas ubicadas en sectores bajos y con precipitaciones la coloración es más cristalino y llano .
Presentación y color de café tostado		
Es amarga, fácil de detectar en cualquiera mezcla	La taza es amarga, objetable si hay más de 10% combinando con de maduración normal	La taza es buena y tiene condiciones de aroma, cuerpo y acidez variables, según el sector de origen.

Figura 2. Tipos de maduración de café
Fuente: (Cléves, 1995)

2.2.3 Cosecha del café

Para garantizar la calidad del café se recomienda la selección de frutos maduros cuya capa externa presente la coloración roja o amarilla según la variedad, aplicando un corte selectivo escogiendo los que presenten el color rojo argentado y que muestren

solidez. Los frutos inmaduros deben permanecer en el arbusto con el fin de que continúen con la maduración y las cerezas sobre maduras se eliminan (Instituto Interamericano de (IICA, 2010).

Con referencia a lo anterior es necesario anotar la procedencia del café cosechado, especificando el lugar del cultivo y los datos del propietario. Para ello se lleva un registro de campo que provea información útil a emplearse por técnicos u operadores encargados de este proceso (Somayo et al. 2014).

Es necesario la ejecución de planes y programas de capacitación orientadas a las personas que realizan la cosecha, así como, al encargado de esta actividad con el fin de contribuir al fortalecimiento de capacidades, destrezas y habilidades del personal que realiza la cosecha manualmente. Es necesario desarrollar y mantener técnicas de manejo selectivo, así como, manejar eficientemente el almacenamiento del café para favorecer su calidad (IICA, 2010).

2.2.4 Transporte del café

Para el transporte del café es importante considerar la estructura organizativa encargada de esta actividad y la previsión de contar con vehículos adaptados para trasladar la fruta desde la plantación hacia el centro de acopio. Siendo responsabilidad del personal encargado de contribuir con condiciones óptimas del vehículo y el transporte, esta actividad debe efectuarse enseguida de la cosecha con el fin obviar el proceso de fermentación del café (Somayo et al. 2014).

2.3 Recepción del café

El IICA (2010) sugiere la importancia de la identificación de las diferentes porciones que llegan a la planta de lavado, anotando el día de ingreso la fecha de ingreso del café, datos del lugar de cultivo, data de recolección y puntuación de calidad. Es recomendable asignar a cada lote el contenido de café correspondiente, dato obtenido a partir del peso.

Las bayas del café que presentan anomalías, se excluyen en función de las características que muestran a la recepción de estos, eliminándose los frutos demasiado maduros, tiernos o poco maduros, dañados por insectos, o frutos que estén muy deshidratados.



Figura 3. Tipos de café
Fuente: (Figuerola et al. 2014)

Posteriormente el café maduro se introduce en el sifón en donde ocurre un proceso de selección, los granos de café de mayor peso pasan a la parte baja del mismo para ser despulpados y conducidos al tanque de fermentación, en tanto que los cafés de bajo peso flotan y son dirigidos para separarlos como frutos vanos (Morales, 2014).

2.4 Clasificación de frutos del café

La catalogación del café consiste en la división de los frutos que presentan problemas con el propósito de buscar homogeneidad por tamaño, seleccionando los frutos que presenten menor tamaño (Somayo et al. 2014).

2.4.1 Separación por flotación

La separación por flotación, consiste en sumergir el café en agua induciendo la flotación de los frutos de café que presentan anomalías, esta capa es retirada del resto por ser un café de mala calidad (Cléves, 1995).

2.4.2 Clasificación del café por tamaño

El café cosechado se clasifica en función del tamaño con el fin de lograr un secado uniforme (IICA, 2010).

La sustancia mucilaginosa ocupa un 40% del fruto del café cuando este ha llegado a la maduración completa. En este sentido los bayas inmaduras o secas no contienen el mesocarpio, por tanto, poseen un tamaño reducido comparados con los granos de café de calidad. Es evidente entonces que la clasificación por tamaño permite la selección de frutos no deseados (Somayo et al. 2014).

2.5 Extracción de la pulpa del café

Los procesos de despulpado consisten en desprender la pulpa y la cascarilla de la semilla de café (Figueroa et al. 2014).

Concordado con Pineda, Reyes y Oseguera (2012) quienes exponen que el despulpado radica en la separación de la semilla del café de la pulpa, por la característica deslizante del mucílago, siendo relevante la ejecución del despulpado cuando el café este completamente maduro. Es necesario despulpar el café al mismo tiempo que se va cosechando siendo ideal realizar esta actividad en menos de 6 horas; en el caso de no ejecutar en el tiempo estipulado, el café debe colocarse en agua por un tiempo inferior a 18 horas, para favorecer la calidad del café evitando que la excesiva fermentación dañe el sabor. Si no se puede realizar la actividad señalada anteriormente es conveniente secar el café. El despulpado es una operación mecánica empleando café de tamaño similar, maduro y del mismo origen para alcanzar un eficiente despulpado, que dependerá de la capacidad del equipo despulpador, calibración frecuente y mantenimiento de esta máquina.

En este sentido, la máquina despulpadora está constituida por un rodillo giratorio cubierto con una camisa de cobre con agujeros eminentes y un pecho de metal en donde los frutos pasan por acción de fuerzas mecánicas, provocando la separación de la pulpa y la retención del grado (Somayo et al. 2014).



Figura 4. Despulpadora fundación ATASIM
Elaborado: Neira, I. 2020

2.6 Operación de clasificación del café pergamino

Para disponer de un café puro se requiere eliminar el pergamino mediante una operación de limpieza y selección, eliminando restos de la pulpa y residuos, empleando un equipo conformado por 2 despulpadoras y una zaranda o criba interpuesta entre estas baterías (Somayo et al. 2014).

Del proceso anteriormente descrito se obtiene el 80% de café de alta calidad conocido como “primer pergamino” obtenido de la primera batería. (Somayo et al. 2014), en tanto que, el segundo pergamino proviene de la segunda batería y se caracteriza por ser de buena calidad, pero el grano es más pequeño que el primero (IICA, 2010).

2.7 Remoción del mucílago

El mesocarpio conocido también como mucílago del fruto de café está constituido por tejidos halinos, no contienen cafeína ni taninos y mide de 0,5 a 2 mm y está pegada a la cáscara de la semilla del café. (García, 2008). Representa aproximadamente el 14,85% del fruto en base húmeda, estimaciones indican que de cada Kg del fruto del café se obtiene 91 mililitros de mucílago fermentado (Mendez, 2014).



Figura 5. Desmucilaginator y mucílago obtenido del beneficio del fruto
Fuente: (Valencia y Alama, 2009)

Químicamente el mucílago está compuesto por “33% de sustancia pécticas totales, 30% de azúcares reductores, 20% de azúcares no reductores y 17% de celulosas cenizas entre otros”. Igualmente, estos elementos presentan pH en un rango de 5,6 y 6,0 (Asociación Nacional del Café, 2013).

La semilla de café permanece limpia cuando éste ha sido despulpado, siendo necesaria este proceso porque contribuye a la disminución de humedad, al secado y al mantenimiento de las propiedades de calidad del café (IICA, 2010).

En el proceso del beneficio húmedo, se aplican dos técnicas de separación del mucílago que se describen a continuación:

2.7.1 Eliminación mecánica del mucílago

La extracción de mucílago de forma mecánica, se basa en el rozamiento de la semilla de café sobre un rotor y una lámina fija provista de hoyos de forma alargadas; por la que se traslada el mucílago, mientras que la semilla se queda en flujo ascendente entrando por la parte inferior de la máquina. (Somayo et al. 2014)

La eficiencia de la remoción del mucílago empleando el sistema mecánico puede verse perjudicado debido a:

- a. Al calibre y tipo de aspas
- b. Rapidez de la rotación
- c. La adherencia del mucílago
- d. Volumen de agua empleado por volumen de producto
- e. Condición del café con mucílago (IICA, 2010).



Figura 6. Desmucilaginado mecánico.
Fuente: (IICA, 2010)

2.7.2 Extracción del mucílago por fermentación

Este proceso se efectúa en recipientes de fermentación cuyo tamaño está en función del volumen producida diariamente (ANACAFÉ, 2013).

En relación con lo anterior, la fermentación se produce por acción de microorganismos y enzimas contenidas en el grano de café mediante tanques que posibilitan la fluidez del mucílago, esto ocurre por procesos bioquímicos, es decir, por la descomposición de la pectina y otros elementos son convertidos en ácido galacturónico, a su vez azúcares en alcoholes y en caso de estar más tiempo en agua, adoptan la forma de ácidos orgánicos (IICA, 2010).

Una vez degradado el manto mucilaginoso sus residuos se sueltan fácilmente, posteriormente se ejecuta el lavado de los granos con agua y se espera el tiempo requerido para finalizar esta etapa. En caso de no concretar correctamente esta parte se pueden presentar problemas en el secado (Somayo et al. 2014).

El tiempo que el café permanece en los tanques varían en función de factores climáticos circundantes, afectando claramente, la temperatura en relación al tiempo. Normalmente esta etapa tiene una duración entre de 6 a 48 horas. Para determinar si el café está libre de sustancias, se emplea una vara redonda introduciéndolo en varios sitios del tanque. Una forma de saber que aún no está listo, es cuando al retirarlos obstruyen la perforación, mientras que, en el momento de extraer la vara y éste queda abierto exhibiendo distintos fragmentos del fruto, se continúa frotando con agua y cuando presenta una contextura abrasiva, indica que el fruto se encuentra en un punto óptimo para lavarlo (Morales, 2014).

Habitualmente se menciona que el signo de fermentación se logra cuando la mezcla de café desciende a un pH 4 (ANACAFÉ, 2013).

También existe un método manual para determinar el punto de fermento en donde manualmente se agarra un puñado de café, seguidamente se aprieta con fuerza y si la muestra seleccionada es áspera y cruje, son signos de que esta lista para pasar al lavado (Somayo et al. 2014).

2.8 Lavado del café

Es una práctica cuya finalidad es obtener un grano de café limpio mediante la eliminación de restos procedentes de la fermentación (mucílago, materiales disueltos) (Asociación de cafés especiales de Nicaragua, 2007).

La eliminación, se logra aplicando dos metodologías a saber: manualmente y mecánicamente. Si se emplea el primero, se requiere sumergirlo y colocarlo en un conducto de agua usando espátulas. En este procedimiento se emplea mayor cantidad de trabajo humano y tiempo en comparación con el lavado en forma mecánica. Desde otra perspectiva, para la limpieza mecánica se usa dispositivos de sólidos y conductos lineales con desnivel homogéneo, pretendiendo mantener en el conducto, un fluido laminar invariable, favoreciendo la categorización del café limpio. En este procedimiento se usa agua de calidad (Morales, 2014).

Estas canaletas permiten clasificar el café de manera eficiente. Usualmente se sacan las natillas, luego la pulpa, seguidamente se extrae el grano de inferior calidad y finalmente, el de café de calidad que presentan mayor peso quedando detenidos en zona posterior de la canaleta (Somayo et al. 2014).



Figura 7. Limpieza del café fermentado
Fuente: (IICA, 2010).

2.9 Secado de café

Técnica compleja que incluye la supresión de humedad, tanto externa como interna presente en el grano después del lavado, la disminución de la humedad del mismo está en función del tiempo y las condiciones de acopio. El grano inicialmente posee 55% de humedad; sin embargo, para lograr que el café tenga buena calidad este rango debe mantenerse entre 10-12% impidiendo el ataque de hongos y aumentando sus fines comerciales (IICA, 2010).

Para precisar el punto de secado de la semilla del cafeto, se realiza el análisis físico valorando su consistencia y coloración; en igual forma se emplea un higrómetro. Cuando

se somete la semilla a temperaturas elevadas, este se muestra duro como resultado de la pérdida de humedad, debido a la reducción del tamaño celular de la semilla. Estos signos indican que el grano no se secó uniformemente porque la temperatura no ingreso al interior de la semilla. Como consecuencia de las temperaturas elevadas se da la volatilización de las propiedades organolépticas del café perdiendo por tanto su calidad. De todo esto se desprende que la desecación se constituye en la fase relevante para conseguir calidad (ANACAFÉ, 2013).

El café puede secarse mediante los siguientes métodos:

2.9.1 Naturalmente

El secado al natural, consiste en colocar el grano de café en espacios abiertos y limpios, siendo recomendable exponerlos al sol por la mañana, evitando así, que el exceso de calor dañe al grano de café. El tendido de café debe realizarse de tal manera que los granos queden expandidos en alturas inferiores a 5 cm, además es necesario airearlo frecuentemente con el fin de garantizar un secado uniforme (Somayo et al. 2014).

Cabe precisar que el secado natural genera costos relativamente bajos, únicamente se requiere contar con sitios adecuados y con gradientes inferiores al 2% (Morales, 2014).

2.9.2 En máquinas secadoras

Con el fin de reducir el contenido de agua del grano de café, se suele emplear secadoras mecánicas, que funcionan con aire forzado, incrementando la temperatura por el uso de diésel o restos de vegetales, e incluso se utiliza la cascarilla del café como combustible. (Somayo et al. 2014)

Similarmente, la fase de secado puede hacerse aprovechando cajones de madera, tambor, láminas de sarán u cualquier tipo de cama, es recomendable airear el café para lograr un secado parejo (Asociación de cafés especiales de Nicaragua, 2007).



Figura 8. Remoción de humedad del café
Fuente: (IICA, 2010)

2.9.3 A la vista

Este método implica analizar visualmente una muestra de café sin cascarilla enfocándose en las características del grano, si presenta un color verde azulado significa que el grano cumple con el porcentaje de humedad adecuado, por el contrario, cuando no presenta esta coloración sugiere que aún tiene un alto contenido de humedad, de tal manera que, necesita más tiempo de secado (Somayo et al. 2014).

2.9.4 Con el diente

Este procedimiento implica morder un grano de café pelado con la intención de observar si el grano de café conserva la señal del diente, de ser así se considera que la humedad contenida es adecuada; si el diente se entierra indica que existe alta humedad y si no queda ninguna huella muestra que el grano está reseco. La misma técnica se puede realizar con un martillo en donde el nivel de humedad se determina en función de la reacción del grano ante los golpes (Somayo et al. 2014).

2.9.5 Determinación de humedad con navaja o cuchillo

Una forma para establecer la humedad del grano de café es mediante el empleo de una navaja o cuchillo para dividir el grano, si las dos partes de la semilla de café brincan hacia los lados indican que la humedad es adecuada; si no salta el grano la humedad

excesiva, en tanto, si este no se rompe, muestra que la semilla del café está totalmente deshidratada (Somayo et al. 2014).



Figura 9. Análisis del contenido de humedad en la semilla de café
Fuente: (ANACAFÉ, 2013)

2.10 Almacenamiento del grano seco

Una vez seco el café debe acopiarse ya sea en sacos, trincheras, silos o bodegas, según el tipo de infraestructura que tenga cada caficultor. El propósito del acopio tiene que ver con la protección de las cualidades y volúmenes de los granos de café, como medida de precaución al deterioro ocasionado por: factores medio ambientales, el ataque de hongos o de insectos-plaga causantes de enfermedades, así como del exceso de humedad que produce olores desagradables al grano de café (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2010).

Según los precios de café, el 46% de productores lo acopian durante 1 a 6 meses, en tanto que el 16% lo almacenan entre 7 y 12 meses y el 38% de caficultores lo guardan en un tiempo mayor a 12 meses (Cabrera, 2005).

Manteniendo las ideas anteriores, Somayo et al. (2014) postulan que el almacenamiento del café lo efectúan teniendo en cuenta las condiciones del clima (temperatura y humedad relativa) según zonas agroecológicas en la que se cultiva el café, además se precisa tener en cuenta la corriente de aire del lugar en el que se almacena el producto.

Con el fin de lograr un adecuado almacenamiento para la conservación del café se debe observar los parámetros siguientes:

- El café tendrá una humedad entre 10-12%
- Los sacos en los que se almacena el café deben colocarse sin tocar el piso ni las paredes.

- Poner el producto en costales de yute o de polietileno.
- Emplear plataformas o material plástico, para protegerlo de la humedad.
- Acopiar el café seco en sitios con suficiente ventilación.
- Controlar temperatura y humedad. (Asociación de cafés especiales de Nicaragua, 2007).



Figura 10. Acopio de granos
Fuente: (IICA, 2010)

2.11 Composición química de los subproductos del café

Los subproductos y aguas mieles del café procedentes del beneficio húmedo causan un impacto ambiental negativo siendo una responsabilidad para el sector cafetalero moderarlos (Anzueto, 2006).

El grano del café puede procesarse también por vía seca (López, 2014). Ambos métodos ocasionan la generación de residuos sólidos los cuales se describen a continuación:

2.11.1 La pulpa

El mesocarpio se constituye como primer residuo derivado del procesamiento del café (Suarez, 2012). Identificado por su coloración rojiza, muestra particularidades similares al comportamiento de una esponja porque absorbe agua en grandes proporciones. La pulpa fruto del café al momento de la cosecha, alberga niveles altos de humedad, por esta razón presenta problemas en el transporte, manejo y transformación en la fabricación y el consumo de café. El 61% del fruto del café lo constituye la pulpa y el mucílago y estos contienen los elementos contaminantes que afectan los cursos de agua en las cuencas hidrográficas y en los suelos (Figueroa et al. 2014).



Figura 11. Pulpa originada del lavado de café
Fuente: (Cenicafé, 1977)

La baya de café contiene un 40% de pulpa equivalente a su peso verde, originada del beneficio húmedo. Estudios demuestran que por cada 1000 kg de café procesado por medio húmedo produce aproximadamente 500 kg de pulpa. Mientras que cuando el lavado se efectúa por procesamiento seco se produce únicamente 90 kg de cáscara (Figuroa et al. 2014). La tabla 1 muestra las sustancias que conforman la pulpa de café.

Tabla 1. Constitución química, pulpa de café.

Determinación	Valor
• pH	4,40
• Humedad (%)	74,83
Compuesto	% base seca
• Taninos	1,80-8,56
• Sustancias pécticas totales	6,50
• Azúcares reductores	12,40
• Azúcares no reductores	2,00
• Cafeína	1,30
• Ácido clorogénico	2,60
• Ácido cafeico total	1,60
• Contenido celular	6
• Fibra detergente neutral	63,20
• Fibra detergente ácida	36,80
• Hemicelulosa	34,50
• Celulosa	2,30
• Lignina	17,70
• Proteína lignificada	17,50
• Proteína cruda	3,00
• Cenizas insolubles	10,10
	0,40

Fuente: (Elías, 1978)

2.11.2 El mucílago

La semilla del cafeto está rodeada de tejido mucilaginoso que pesa entre 15 al 22% del fruto maduro, estos compuestos contienen abundantes azúcares y pectinas que rodean a la almendra del café, tiene un grosor de 0,4 mm, se le atribuye al mucílago la propiedad de dispersar y la formación de la semilla, adicionalmente sirve como fuente de agua y de nutrientes (ANACAFÉ, 2013).

El mucílago es una capa gelatinosa que tiene compuestos de carbono expresados en cuya demanda química de oxígeno es de 26,53 mg. (Somayo et al. 2014). La tabla 2 exhibe las sustancias constituyentes del mucílago.

Tabla 2. Mucílago: Constitución química

Componente	% Base seca
• Sustancias pécticas totales	35,8
• Pectina	5,70
• Carbohidratos totales	50,00
• Azúcares reductores	30,00
• Azúcares no reductores	20,00
• Nitrógeno	0,95
• Proteína	5,95
• Acidez	4,56
• Ceniza	4,10

Fuente: (Carbonell y Vilanova, 1974)

2.11.3 Aguas mieles

Aguilera, Consuegra y Rapado (1988) caracterizan a igual que Torres, Villarrea, Ramírez y Serna (2019), a las aguas resultantes del lavado de café como aguas mieles debido a que estas integran cantidades variadas de glúcidos, poseen pH ácido 4-4,5 y una elevada carga de MO. Además, las aguas mieles contienen sustancias bioactivas con potencialidad para ser empeladas en la agroindustria, en farmacología y en cosmético, por los principios activos que posee como: cafeína, ácido acético, propiónico, fenoles, entre otros.

La relevancia de remediar aguas mieles provenientes del lavado de café, se basa en la oxidación de la materia orgánica (Hernández y Hidalgo, 2000).

El origen químico del agua residual del café, depende de los componentes físicos y químicos de las sustancias mucilaginosas y de la pulpa incluida en ésta, que al mantenerse en contacto con el agua de lavado en movimiento se desintegran en elementos más pequeños. De esta forma, se producen aguas mieles que tienen una elevada carga de materia proveniente de los dos lavados necesarios para dejar limpia la almendra de café, con valores de 43,615 mg DQO (ANACAFÉ, 2013).

Los vertidos del beneficio húmedo del café cuando son tratados previamente antes de ser arrojados a los cuerpos receptores, se obtiene agua clarificada y por otra parte lodos orgánicos, material que puede ser utilizado como abono, debido a que contiene sustancias orgánicas y minerales tales como NPK (ANACAFÉ, 2013).

2.11.4 La cascarilla

El exocarpio conocido como cascarilla es la parte externa del fruto del café y representa el 12% de este, la parte intermedia se la denomina mesocarpio o mucílago. La cáscara del café está compuesta principalmente de celulosa y lignina (Figuroa et al. 2014).

La cáscara de café suelta es un desecho y representa entre el 4,5-5% del peso total de la baya drupácea del cafeto, puede emplearse como combustible generalmente utilizado para secar el café de forma mecánica y produce cerca de 4,000 kilocalorías por kilogramo (ANACAFÉ, 2013).

2.12 Parámetros físico-químicos para la caracterización de aguas mieles

El contenido de MO en el agua residual del café, se determina en función de parámetros físico químicos detallados a continuación según la Asociación Nacional del Café (2013):

Potencial de hidrógeno (pH): Es un coeficiente que mide el grado de acidificación o basicidad que precisa el contenido de H, que se encuentra incluido en sustancias o soluciones. La escala numérica tiene valores que van del cero al 14. Valores inferiores a 7 se catalogan como ácidos y mayor al pH 7 son alcalinas o básicas. Así por ejemplo el H₂O natural posee un pH neutro.

Sólidos disueltos totales (TDS). Los TDS son parámetros usados para establecer la cualidad del agua. Los TDS se los definen como la cantidad absoluta de sales diluidas y se explicitan en mg/l o en partes por millón (ppm).

En este sentido, las soluciones que contienen sales, permiten la conductividad eléctrica. Para ejemplificar un líquido que incluya sales, deja pasar mayor corriente eléctrica comprada con otra disolución que presente cantidades menores o que no las incluya; debido a esto, la conductividad posibilita la estimación ágilmente de la concentración de sales en el agua o en una solución. Entre estas se observan que las de mayor concurrencia son: Ca, Mg y Na.

El Ca y Mg están contenidos en un 90% en aguas no salobres, causando estos elementos molestias al momento de usar el H₂O. De lo anterior deviene que el contenido de NaCl representa una porción de salinidad, en tanto que, el Mg y Ca confieren la característica de la dureza del H₂O, siendo también parte de la salinidad (García de la Fuente, 2013).

Sólidos totales (ST). Los ST se los concibe como la materia en suspensión y diluida en el H₂O, que deterioran la condición natural del agua o a su dotación de forma

diferenciada. También se conceptualizan, como sustancias que prevalecen bajo la forma de desechos luego de evaporarlos y secarlos a temperaturas comprendidas entre 103 - 105 °C.

El análisis de ST determina la cantidad absoluta de sustancias diluidas y no diluidas. Los materiales luego del secado en las temperaturas indicadas anteriormente, son capaces de almacenar aguas derivadas del proceso identificado como red cristalina y del H₂O atrapada al formarse cristales. Del mismo modo, existe disminución de CO₂ debido a la transformación bicarbonato en carbonato. Por otra parte, La evaporación ocasiona un decrecimiento leve de las sustancias orgánicas. En último lugar, la determinación de ST son sustanciales para la gestión de técnicas de sistemas biológicos y físicos en efluentes, a propósito de valorar la observancia de las restricciones que normalizan el derrame de los mismos (Carpio, 2007).

Demanda química de oxígeno (DQO): Es un índice calculado entre el contenido de materia orgánica y mineral disuelta o en suspensión a ser oxidadas en efluentes. y constituye la proporción de oxígeno necesario en la reacción redox total de la MO, se la designa en mg/l.

Demanda biológica de oxígeno (DBO₅): La valoración del DBO₅ mide la cantidad de O₂ consumido por los microorganismos durante 5 a 20 días, en una prueba de agua como respuesta de la descomposición aeróbica del material orgánico, como parte de esta solución en estudio.

La colocación final de residuos orgánicos, sólidos y líquidos es un procedimiento complicado por los contaminantes que contiene. No obstante, la opción adecuada para la disposición de componentes contaminantes resulta ser la transformación de estas, en elementos que vuelvan al medio ambiente en forma segura o mediante el aislamiento de sustancias químicas purificadas para usarse en otras actividades (ANACAFÉ, 2013).

Fósforo: El crecimiento y multiplicación de los microorganismos dependen del fósforo, elemento que ayuda a la estabilización de la MO en efluentes. Cuando la proporción de fósforo es grande, ocasiona hipereutrofización en cuerpos de agua quietas o estancadas como: lagos, humedales, pantanos, embalses, lagunas (Tapia y Garcia, 2013).

González y Saldarriaga (2014) citado en Mendoza y Párraga (2021) expresan que un cuerpo de agua es de calidad cuando el contenido de nitrógeno es superior al del fósforo permitiendo el desarrollo de microorganismos, en cambio, la ausencia de fósforo impide el crecimiento de algas y plantas acuáticas. No obstante, las aguas residuales contienen fertilizantes, tensoactivos y sustancias fosforadas en cantidades grandes, factor entre otros

que facilitan el crecimiento de algas que colonizaran la superficie y dificultan el paso de la luz, con la consecuente disminución de la vida presente en este medio y la falta de fotosíntesis.

Nitratos: son combinados sintéticos minerales procedentes del N, estos se hallan naturalmente en proporciones reducidas en suelos, también se encuentran en productos alimenticios, en el agua superficial y freática. Generalmente, en sectores agropecuarios se identifica aumento de la cantidad de nitratos presentes en las aguas debido al uso intensivo de abonos nitrogenados históricamente utilizados en sobre dosis, contrariamente a lo que necesitan y pueden absorber los cultivos (Sociedad de Fomento Agrícola Castellonense, 2017).

Se precisa además que los vertidos de aguas residuales y estiércol animal originado en lugares que se dedican a ganadería configuran una fuente de nitratos en el medio acuático (SFAC, 2017).

Los nitratos son elementos que se disuelven en agua y son utilizados por los cultivos o vegetales para su crecimiento, empero cuando, aparecen en grandes cantidades provocan una sobrepoblación de algas y de varios organismos causando la eutrofización de las aguas (Poveda, 2014).

El nitrato es una sustancia contaminante, constituyente del agua subterráneas y provoca impactos negativos. El nitrato es inodoro e incoloro. Cuando se encuentra en densidades bajas se atribuye que está en condiciones normales, de otro modo elevadas cantidades de este componente causan contaminación de fuentes de agua potable. En áreas sin la intervención humana, las aguas subterráneas poco profundas tienen una concentración inferior a 2 mg/l de nitratos. Los nitratos se originan: de abonos químicos, del excremento de animales o compost y fosas sépticas. Estos compuestos se encuentran en grandes cantidades, como se mencionó en párrafos anteriores en tierras de la ruralidad derivadas de las prácticas agrícolas inadecuadas. La movilidad de los nitratos hasta las aguas del subsuelo, ocurren debido a que son arrastrados por el agua de riego y por la precipitación (Brown y Rodríguez, 2013).

Nitritos: tanto nitratos como nitritos son mezclas solubles que albergan N₂ y O₂. En el medio, los nitritos (NO₂) comúnmente son transformados a nitratos (NO₃), precisándose que los nitritos acontecen esporádicamente en aguas subterráneas. El Nitrito se emplea para tratar carnes, en la producción de explosivos y en el mantenimiento de calderas industriales (Singler y Jim, 2012).

Los nitritos igualmente se crean por procesos de biodegradabilidad de NO_3 , NH_4 y otras mezclas naturales que contienen nitrógeno y son empleados como parámetro de polución por excrementos presentes en aguas (Cabrera, Hernández, Gómez y Cañizares, 2003).

El nitrito se halla como ion nitrito (NO_2) de igual forma como ácido nitroso (HNO_2); la cantidad de cada uno de estas sustancias, están en función directa con el pH del agua para el ion e inversamente proporcional para el ácido; los dos componentes se catalogan como altamente dañinos. La toxicidad disminuirá con la incorporación de cloruros y de otros elementos poco eficaces como el bicarbonato y el calcio. Consecuencia como la disminución inmunológica, se dan cuando existe una exposición toxicológica por largo tiempo, provocando patologías a los organismos acuáticos conduciendo a la desaparición de especies, similarmente los seres marinos merman capacidad de osmorregulación, evidenciándose la abstención de los periodos de reproducción (Cabrera et al. 2003).

La cantidad de nitratos (NO_3) y nitritos (NO_2) en aguas naturales son parámetros significativos para determinar la calidad de estas. Los nitratos y nitritos están en relación directa con la mineralización del nitrógeno contenido en el suelo y vegetales superiores, por el contrario, los primeros son incorporados a través de abonos químicos, dando lugar al incremento de la concentración de nitratos. Al mismo tiempo, los nitritos se desarrollan en el proceso de biodegradabilidad de nitratos, nitrógeno amoniacal u otras sustancias orgánicas nitrogenadas. Se emplea como señal del grado de polución en aguas residuales (Cabrera et al. 2003).

Turbidez: La turbidez se la define como el problema del agua para transferir la luz por la cantidad de sólidos en suspensión disgregados que se encuentran especialmente en aguas superficiales. Estas partículas no solubles (mayores a 10^{-6} m) son de origen mineral (arena, limo y arcillas) u orgánicos (producto de la desintegración de plantas y animales). Así mismo, a los microbios como: bacterias, plancton, algas y virus se les atribuye como causantes de la turbidez y de la coloración del agua. La turbidez se cuantifica en Unidades Nefelométricas de turbidez, o Nephelometric Turbidity Unit (NTU) (Guzmán, Villabona, Tejada y García, 2013).

2.13 Deterioro ambiental derivado de desechos del café

Las aguas naturalmente albergan pequeñas cantidades de contaminación, pero si se descarga a un cuerpo receptor las aguas residuales de la industria cafetalera, estas confieren abundante MO, la misma que será degradada por microorganismos especialmente bacterias, las cuales gastan abundantes niveles de O_2 disuelto (ANACAFÉ, 2013).

El deterioro para el cuerpo receptor, se da por la alta demanda de oxígeno por parte de bacterias, en relación con el volumen de oxígeno disuelto recién formado en el agua. En este sentido cuando el oxígeno se termina, las necesidades de este elemento son proporcionadas por el oxígeno que forma parte de nitratos (NO₃⁻) y sulfatos (SO₄²⁻) deduciéndose que, en las fases finales de la reacción química se forman mezclas de sustancias como el bisulfuro de hidrógeno (SH₂); siendo esta sustancia la que confiere mal olor a las aguas en análisis (Somayo et al. 2014).

Los lixiviados se forman por los fenoles contenidos en la pulpa de las aguas mieles; los fenoles al entrar en contacto con el aire, adquieren una tonalidad negra, siendo una propiedad típica de los lixiviados (Ramirez, Oliveros y Sanz, 2015).

Cuando se vierten los subproductos del café, principalmente la pulpa y aguas mieles en los cursos de agua, se ocasiona deterioro en la calidad de estos, debido al contenido de sustancias perjudicando el recurso por las siguientes razones:

1. Influyen en el cambio del pH del agua a pH 2,5 por la presencia de ácidos orgánicos (acético, butírico, propiónico, etc.) formados en el proceso de transformación anaerobia de la MO.
2. Disminuye el oxígeno disuelto (OD) en agua, debido a la demanda de microorganismos para lograr descomponer la MO.
3. La turbidez del agua aumenta, por la presencia de polifenoles y por los sólidos suspendidos (ANACAFÉ, 2013).

Los desechos y productos secundarios del café, se convierten en una fuente peligrosa de contaminación y deterioro ambiental. Debido a esto desde los años 50, se han evaluado varias técnicas para su reutilización ya sea como insumo utilizado en la elaboración de forrajes, refrescos, condimentos, biometano, cafeína, y abonos entre otros (Rathinavelu y Graziosi, 2005).

El café por el contrario a otros productos de la agricultura debe ser modificado para su venta. El fruto cosechado es tratado ya sea por vía seca o húmeda, con el fin de conseguir el grano en “oro” o en “pergamino”. En la actualidad el beneficio húmedo es una técnica generalmente usada por los caficultores. Varios caficultores mencionan que el beneficio húmedo ayudó al mejoramiento de propiedades del café, tanto en el aspecto de la almendra y similarmente en los rasgos organolépticos de la taza, obteniendo como resultado mayor precio en mercados; sin embargo, la elaboración de un “buen café” implica un coste socioambiental.

Inconvenientes causados por contaminación originado por las “aguas mieles” del café se lo aborda como problema de corte ambiental, conceptualizado como los problemas ambientales que ocurren cuando se tensiona la estabilidad histórica lograda entre la población y su entorno, como resultado de la intervención de actor o actores que perturban las interrelaciones entre una colectividad y el medio que les rodea; o cuando una población cambia su relacionamiento con el entorno perturbando la utilidad del otro.

En consecuencia, lo “*que se da es un conflicto de intereses entre dos actores en un medio ambiente específico, en otras palabras, se da un enfrentamiento por diferentes intereses con el medio ambiente*”. De manera similar, los conflictos por temas ambientales son aquellos en los que concurre una pugna por un recurso natural o por el impacto negativo derivado de la utilización del mismo, sin debatir las formas de extracción o sin concurrir una intencionalidad declarada de conservación o de usar sosteniblemente los recursos (Montero y Sandí, 2009).

Morales et al. (2020) manifiestan que en la industria de café se producen grandes cantidades de aguas mieles, las cuales al ser arrojadas directamente al ecosistema afectan a: aguas profundas, subsuperficiales, así como, al suelo debido a su contenido abundante de carga orgánica y pH ácido.

Similarmente para Fernández, Sotto y Vargas (2020) el mucílago del café conocido como agua miel, es un producto secundario obtenido del beneficio húmedo del café, su inadecuada gestión causa deterioro a fuentes hídricas, desprendimiento de olores fétidos y propagación de dípteros y otros insectos.

Lo descrito anteriormente concuerda con Álvarez, Smeltekop, Nicanor y Loza (2011) quienes posicionan a la agroindustria del café, como la más dañina causando impactos adversos al medio ambiente, indican además que el proceso del beneficio húmedo es la técnica mayormente empleada en Centroamérica, México y Colombia y se origina como un método alternativo para corregir la dificultad de fermentación contigua y abundante del café en sitios de cultivo.

Posteriormente a la recolección del fruto, se procede a descartar las partes exteriores del mismo, después los frutos son colocados en máquinas para despulpar en donde se excluye la pulpa ubicándolos en recipientes de fermentación para dar lugar a la hidrólisis del mucílago a través de la actuación de enzimas contenidas en el grano de café y de

microbios presentes en el agua, siendo cambiante el periodo fermentativo. (Álvarez et al. 2011).

El volumen de MO presente en efluentes originados en procesos de fermentación de *Coffea* está en función de la capacidad aprovechada durante lavado y específicamente del reciclaje o no del agua. Investigaciones analizadas por Claass (2003) mencionado por Álvarez et al. (2011) describen que la concentración está en un rango de 7000 y 12000 mg/l de DQO, con pH ácido (3,8) que entran a la planta piloto; que al contrastarlas con aguas residuales urbanas contienen 500 a 1000 mg/l de DQO, es decir, que las aguas mieles, son responsables del incremento de este parámetro.

Morales et al. (2020) indican que las aguas contaminadas derivadas del beneficio húmedo de *Coffea*, aumentan el grado de la demanda biológica de oxígeno (DBO₅) en corrientes y afluentes alcanzando concentraciones superiores a 2500 mg/l de oxígeno molecular, así como, cantidades excesivas de sólidos suspendidos equiparando la luminosidad, cuya relación está en función de la capacidad del agua empleada en el beneficio del café. La dimensión del daño ambiental se acrecienta porque las aguas tienen un color oscuro preponderante, factor que se interpone a la radiación solar necesaria para el desarrollo de organismos que viven en el agua, perturbando también la cadena nutricional de cualquier medio acuático si se descargan directamente, es decir, si estas aguas no han sido tratadas con anterioridad.

El interés de brindar tratamiento a las aguas provenientes del beneficiado, reside en procesos oxidativos de MO presente en estas, y se realiza por intervención de la microflora consumiendo el material orgánico y absorbiendo el OD contenido en el efluente. Cuando ocurre un derrame significativo de las aguas residuales, se extingue el oxígeno (por el consumo de bacterias anaeróbicas) con la consecuente muerte de plantas y animales acuáticos por disnea según Hernández, Hidalgo (2000) mencionado en (Álvarez et al. 2011).

La relevancia del manejo de los vertidos resultantes del lavado del café, se basa en procesos oxidativos de la MO presente en estos, por tanto, las aguas mieles antes de ser vertidas al cuerpo receptor deben ser tratadas, mediante operaciones alternativas de bajo costo, usando plántulas que absorben y acumulan compuestos orgánicos, configurando atributos correspondientes a técnicas físicas y químicas como jacinto de agua, la totora, el carrizo, el junco y otras especies vegetales incluidas las de la familia poaceas.

Generalmente, con el empleo de lechuguín (*Eichhornia crassipes*) y lenteja acuática (*Lemna minor L.*), se logra eliminar el 70% y el 86% de materia orgánica. De lo anterior se atribuye a la mitigación del agua miel usando plantas hidrófitas, como la técnica que favorece a las personas impidiendo la propagación de parásitos y enfermedades, de tal forma, que éstas se reutilicen como aguas de regadío para plantaciones (Álvarez et al. 2011).

Resultados de vertidos del procesamiento del café en cuerpos receptores

El agua residual del beneficio húmedo de café, contiene considerables porciones de material orgánico que al ser dispersado en el medio ambiente presenta consecuencias negativas según Molina y Villatoro (2006) que se detallan a continuación:

Incremento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en el Agua: debido a la diversa y gran población de microorganismos que necesitan oxígeno para vivir, reproducirse y degradar la materia orgánica.

Disminución del oxígeno disuelto en el Agua: porque millones de microorganismos presentes en el agua consumen grandes cantidades de oxígeno para degradar la materia orgánica.

Disminución del pH en el agua: La acidez del agua de despulpe altera el pH de cuerpos receptores, acidificando el agua de estos cuyo hábitat se ve sensiblemente afectado a los cambios de pH.

Alto consumo de agua: normalmente procede de una fuente o cuerpo receptor cercano. Los beneficios de café para ahorrar costos siempre están ubicados cerca de un nacimiento permanente de agua en la época que se realiza el lavado del café; proceso en el que emplea gran cantidad de agua procedentes de estos, ocasionando que los caudales se reduzcan cuantiosamente.

Acidez del suelo aledaño a cuerpos receptores: el agua excedente al ser derramada en cuerpos receptores o en suelos, disminuye sus nutrientes naturales y sus propiedades de reproducción. Los folíolos de las plantas muestran quemazón y los tallos presentan ciertas deformaciones en el diámetro de estos.

Alteraciones a la flora y fauna acuática: se da por la ausencia de oxígeno y el descenso de pH en el agua, con la consecuente supresión de peces, entre estos las carachas (*Callichthys callichthys*), cachamas (*Colossoma macropomum*), así como de las plantas acuáticas: algas, musgos, hepáticas y helechos (Molina y Villatoro, 2006).

Erosión potencial por cárcavas: ocasionada por el incremento súbito del caudal en consecuencia de los vertidos, produciendo diferentes niveles de erosión en suelos, ríos o quebradas.

Cambios en el paisaje acuático y terrestre: se da un incremento de bacterias por las condiciones anaeróbicas ante la falta de oxígeno disuelto (OD), por tanto, el agua se desintegra apresuradamente y cuando esta es descargada en el suelo o en afluentes tales como quebradas y riachuelos provocan la erosión hídrica y la formación de charcos de agua con grandes cantidades de sedimentos o material generando efectos adversos al entorno.

Incremento excesivo de materia suspendida en el fluido: por la concentración de partículas orgánicas suspendidas en el líquido este se vuelve turbio y oscuro, disminuyendo la calidad del paisaje en el sitio receptor.

Problemas para el consumo: como consecuencia de lo analizado en los párrafos anteriores, resulta inadecuado la utilización del agua para el consumo animal y no es menos cierto, su empleo para consumo humano. Convirtiéndose el cuerpo receptor en un enorme lago derivado de la contaminación (Molina y Villatoro, 2006).

2.14 Fitorremediación

La fitorremediación tiene su origen como técnica ambiental en la década de los 80, es un tratamiento empleado en la remoción, transferencia, estabilización, concentración o reducción de sustancias tóxicas de tipo orgánico e inorgánico, mediante el uso de plantas estos contaminantes se encuentran en diferentes medios tales como: fangos, suelos y sedimentos. Esta técnica se utiliza tanto en el lugar que se produce como fuera de él. Las técnicas de fitorremediación comprenden “la rizo degradación, la fito extracción, la fito-degradación y la fito estabilización” (Agudelo, Macias y Suárez, 2005).

Entre los contaminantes orgánicos remediados y documentados se incluyen: hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH's) dioxinas, disolventes clorados, compuestos aromáticos, hidrocarburos de petróleo, productos farmacéuticos, herbicidas, fungicidas e insecticidas, entre otros. Cabe mencionar que los contaminantes orgánicos resultan ser poco dañinos para la cubierta vegetal debido a su baja reactividad y bioacumulación relativamente menor a contaminantes inorgánicos. Entre las sustancias tóxicas inorgánicas están los metales pesados (Co, Cr u Cu) y los no metales (As y B) y radionucleidos como

Cobalto 80 y Cesio 137, la planta asimila estos elementos y los emplea, generalmente, para su nutrición y crecimiento de las plantas. La nocividad de los componentes inorgánicos depende la proporción, persistencia y el estado químico en las que se hallen (Delgadillo et al. 2011).

Tabla 3. Beneficios y limitaciones de la fitorremediación

Ventajas	Desventajas
1. Ocurre en el sitio y fuera del sitio	1. Al emplear arbustos o árboles, los procesos de fitorremediación tardan demasiado.
2. Funciona sin mover contaminantes, reduciendo la propagación de sustancias en el agua y el aire.	2. Se limita a áreas de contaminación superficial al sistema radical de las plantas.
3. Se la considera como una técnica sostenible.	3. Las plantas durante su desarrollo están condicionadas por el contenido de sustancias nocivas.
4. Eficaz para las sustancias tóxicas orgánicas e inorgánicas.	4. Cuando se de procesos de Fito volatilización, las sustancias tóxicas almacenados en las hojas vuelven al ambiente.
5. Esta técnica es relativamente barata.	5. Los tóxicos depositados en troncos son eliminados en operaciones de incineración.
6. No necesita de personas especialistas para su gestión.	6. Existen ciertas plantas que son acumuladoras.
7. No utiliza energía.	7. Ciertas sustancias tóxicas aumentan su solubilidad, causando un considerable deterioro del ambiente y traslado de contaminantes.
8. Emplea experiencias agrarias convencionales.	8. Emplea espacios amplios
9. Casi no deteriora el ambiente.	9. En medios acuáticos favorece la multiplicación de insectos, especialmente de la orden díptera.
10. Promueve la mejora de los atributos físico-químicos del terreno, por desarrollar una capa vegetal.	
11. De gran aceptación porque crea condiciones de mejoramiento del paisaje.	
12. No utiliza excavación ni maquinaria pesada.	
13. Es aplicable en aire, suelo, sedimentos.	
14. Admite el reciclaje de los recursos	

Fuente: (Delgadillo et al. 2011)

2.14.1 Importancia y conceptos

Su importancia radica en la reducción de la contaminación de sustancias de tipo orgánicos e inorgánicos, la efectividad depende de las propiedades de la planta y su capacidad para asimilarlas o descomponerlas, además del recurso a remediar (Nuñez et al. 2004).

Se conocen tres mecanismos para la fitorremediación involucrando la degradación de contaminantes: 1) físicos (filtración, adsorción, volatilización), 2) químicos (reacciones óxido-reductivas, precipitación, hidrólisis, procesos fotoquímicos, y 3) biológicas (metabolismo microbiano, de la planta, bioabsorción). Como se detalló con anterioridad, la mayor carga contaminante en aguas mieles es orgánica; similarmente la fitorremediación

considera: a) la desintegración de sustancia (interna y externa de la planta), b) procedimientos degradativos completos de sustancias tóxicas y c) absorción de contaminantes. El metabolismo de compuestos orgánicos mediante plantas se produce en tres pasos Cherian y Oliveira (2005), que se detallan a continuación

- Fase I: Conversión/activación de mezclas orgánicos lipofílicos.
- Fase II: Relación de metabolitos (fase I) con moléculas hidrofílicas como azúcares, glutina y aminoácidos.
- Fase III: Los contaminantes orgánicos se compartimentan llegando a formar vacuolas o enlaces con la pared celular (lignina y hemicelulosa).

Se conocen 400 especies que se utilizan en fitorremediación y se las clasifica en:

- a) **Plantas acuáticas flotantes:** conocidas como vegetales macroscópicos, poseen la función de duplicar su masa biológica en poco tiempo y cuando están completamente fertilizados su productividad es significativa. Entre estas, se destacan las siguientes: jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), la lenteja de agua, (*Lemna spp*) Helecho de agua (*Azolla caroliniana*), lechugas de agua (*Pistia stratiote*), Oreja de elefante (*Salvinia auriculata*) y pita de agua (*Stratiotes aloides*) (Poveda, 2014).

- b) **Plantas no flotantes:** Designadas como acuáticas sumergidas; este tipo de plantas engloba a las especies con sistema radical y vegetación que crecen dentro del agua, favorecen la aireación del agua. Así mismo, cumplen un rol significativo porque ofrecen una cantidad frecuente de O₂ a vegetales y animales. Entre estas se mencionan al: papiro (*Cyperus papyrus*), carrizo (*Phragmites communis*), totora (*Scirpus californicus*) mencionadas por (Poveda. , 2014).

- c) **Plantas emergentes:** En este tipo de plantas las raíces crecen encubiertas en los sustratos y la parte aérea se desarrolla sobre la capa superficial del agua. Sus órganos de reproducción se encuentran en la parte superior de la planta. Las plantas que corresponden a esta categoría entre otras están: *Phragmites communis*, *Sagitaria latifolia*, *Thypa dominguensis*, *Schoenoplectus californicus*, y *Eleocharis sp.* (Nuñez et al. 2004).

Tipos de plantas utilizadas en la fitorremediación

Jaramillo y Flores (2012) sugieren que las plantas a utilizarse presenten las siguientes características:

- Resistencia a grandes cantidades de sustancias tóxicas.
- Almacenar metales.
- Presentar una ágil tasa de incremento y productividad.
- Plantas nativas o adaptadas a las condiciones naturales del lugar
- De fácil recolección.

2.14.2 *Eichhornia crassipes*

El Jacinto de agua designado como nenúfar, es un vegetal acuoso que dura mucho tiempo, con un sistema vascular que le permite flotar libremente y posee raíces fibrosas, sumergibles y generalmente coloreadas. Habita en zonas cálidas y frías, posee corolas de color lila y azuladas. En el ámbito mundial, se la ubica en el octavo lugar por su vertiginoso desarrollo, características morfológicas que permiten su expansión y colonización de varias zonas. Es capaz de crecer tanto en aguas dulces y quietas o de corrientes ligeras, es conocida como mala hierba del agua. En la actualidad, su repartición geográfica en el campo mundial se centra en regiones tropicales y subtropicales.

Se multiplica por propagación vegetativa, es decir, asexualmente, y por semillas (reproducción sexual), estas tienen capacidad de rebrote una vez se descartan las plantas adultas. Duplica su medida en 10 días, y logra un crecimiento adecuado cada planta en un periodo de 8 meses, puede originar 70.000 plantas hijas, alcanzando un tamaño de 0,50-150 cm, medido desde el ápice hasta el sistema radicular (Jaramillo y Flores, 2012).

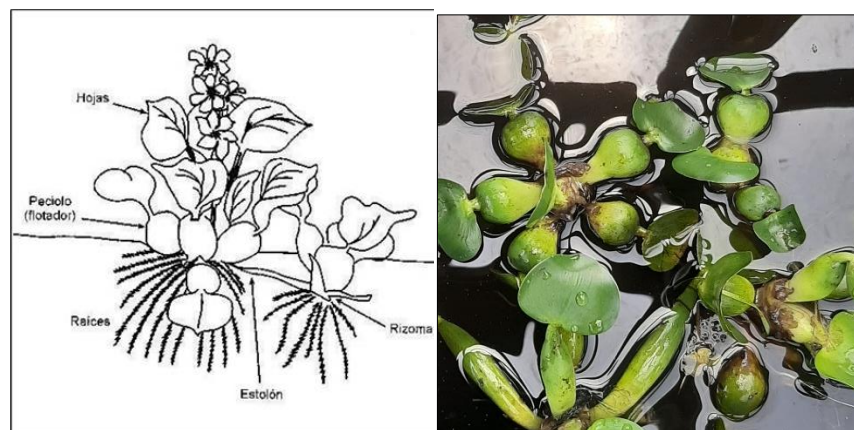


Figura 12. Estructura anatómica de *Eichhornia crassipes*
Fuente: Izq (Romero, 2002): Dch. autor

En la tabla 4, se ilustra la taxonomía de *Eichhornia crassipes* mostrándose la siguiente clasificación:

Tabla 4. Clasificación *Eichhornia crassipes*

Reino	Vegetal
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Pontederiales
Familia	Pontederiaceae
Genero	<i>Eichhornia</i>
Especie	<i>crassipes</i>

Fuente: (Romero, 2002)

Esta planta está constituida por el 93 y 95% de agua, dependiendo del entorno en la que se desarrolle.

La tabla 5 muestra las propiedades químicas del Jacinto de agua con una proporción predominante de carbohidratos con 44,8, seguido de proteína y fibra con el 18 por ciento y cantidades menores de fósforo nitrógeno y grasa.

Tabla 5. Constitución *Eichhornia crassipes*

Constituyente	% de masa seca	
	Promedio	Intervalo
Proteína cruda	18,1	9,7-23,4
Grasa	1,9	1,6-2,2
Fibra	18,6	17,1-19,5
Ceniza	16,6	11,1-51,6
Carbohidrato	44,8	36,9-51,6
NTK	2,9	1,6-3,7
Fósforo	0,6	0,3-0,9

Fuente: (Romero, 2002)

2.14.3 *Cyperus luzulae* (coquito)

Para Fedon (2007) *Cyperus luzulae* es una de mata de larga duración, derivada de las Ciperáceas. Esta planta está distribuida en todo el mundo, se extiende desde Brasil a México y debido a su gran adaptación puede vivir en una gran variedad de ambientes contaminados (Montesdeoca, 2019). Ver tabla 6.

Tabla 6. Descripción taxonómica de *Cyperus Luzulae*

Reino	Plantae
Phylum	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Cyperales
Familia	Cyperaceae
Género	<i>Cyperus</i>
Especie	<i>luzulae</i>
Nombre común	<i>Cabezona, coquito.</i>

Fuente: The plant list. Org Mencionado por (Montesdeoca, 2019)

En 1986, esta planta la descubrió Christen Friis, las particularidades morfológicas de *C. luzulae* son: raíces fibrosas, talluelos simples de sección triangular, tubulares, miden desde 20 a 70 cm. Tienen foliolos en tonalidades que varían del verde claro a blancuzco, las hojas son invertidas dispuestas como un signo en V, miden entre 0.05-0.12 y 40 cm. Las flores son en espigas que presentan hojas modificadas como hilos, miden entre 0-7 cm; la inflorescencia racemosa tiene un tamaño entre e 150 mm x 110 mm, pudiendo ser de forma oval o piramidal. Flores con un estambre y aquenios más largo que anchos, alargado y con los bordes paralelos o estambres en elipse, son hermafroditas o contienen un solo sexo, presentando una coloración entre gris a negruzco. Contienen un par de brácteas protectoras de la espiguilla. El conjunto del cáliz y corola constituido por once apéndices. Posee de uno a tres estambres con filamentos libres, las anteras están unidas en la base, con gineceo súpero que contiene un solo ovulo. Fruto con sección triangular angosta en forma de elipse mide 0.01 x 0.02-0.03 mm, con nervios o líneas formando una red (Soto, Vallejos, Herrera y Rojas, 2004). Ver figura 13.



Figura 13. *Cyperus luzulae*

2.14.4 *Eleocharis sp.* (Junco)

El junco tiene una distribución mundial, crece en regiones templadas y cálidas encontrándose en superficies cubiertas de humedad como: ciénagas salobres, con cercanía al océano o en áreas densas contiguas a fuentes medicinales (Davidse, Chater y Sousa, 1994).

Tabla 7. Características *Eleocharis sp* (junco)

Nombre científico	<i>Eleocharis sp.</i>
Nombre vulgar	Junco
Familia	Cyperaceae
Origen	Nativa
Hábito de crecimiento	Hierba
Medio	Terrestre
Vive en humedal	Si
Dispersión	Agua
Multiplicación primordial	Vegetativa
Multiplicación secundaria	Semilla
Estado	Intermedia
Tallo	Porciones aéreas erectas, tubulares con orificios, mide hasta 100 cm de altura, exhibe paredes delgadas que se desgarran provocando sonido al forzar el tallo
Inflorescencia	La inflorescencia en espiga densa y corta de color café ubicada en la parte terminal
Fruto	Seco

Fuente: (Suárez, Roa, Brown y Vargas, 2002).

Descripción morfológica:

Hierba perenne, rizomatosa, tallos 15-150 cm de largo, 1,2-10 mm de ancho teretes, presenta septos conspicuos a intervalos de 7-10 mm del tallo. Vainas rojizas a purpúreas, el ápice truncado, frecuentemente corto-mucronado. Espiguillas ancho ovoides, 7-32 mm de longitud, multifloreado, densamente agrupadas; glumas membranáceas, obtusas, pardas, a veces muy pálidas cuando inmaduras, los márgenes hialinos. Estambres 3; estilo 2-fido o 3-fido. Aquenios de tamaño entre 0,11 a 0,2 x , 0,05-0,06 cm de forma alargada hasta obovoides, biconvexos a obtusamente triquetros, amarillo-ocres, reticulados, ápice terminando en cuello para luego ampliarse y formar la base del estilopodio; cóncavo, alargado, lanceolado, 0,06 a 0,08 x, 0,02 a 0,03 cm., grisáceo-blanquecino; cerdas hipóginas 6-8 más largas que la suma del espacio del aquenio más el largo del estilopodio, retrorsamente dentadas (Fedón, 2018).



Figura 14. *Eleocharis* sp. (Junco)

2.15 Humedales artificiales (HA)

En el 2005, el Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente (CIEMA), define a un humedal como el sitio conformado por suelos saturados y por comunidades (flora y fauna) adaptados a organismos acuáticos y humedales en (Arias et al. 2010). La palabra humedal hace referencia a áreas que presentan componentes característicos a saber:

- Agua disponible: la zona persiste sumergida continuamente con un calado de hasta un metro.
- Tierras particulares: catalogados como saturados.
- Cubierta vegetal: predominan plantas macrobióticas aclimatadas a condiciones del medio acuático y terrestre.

Los HA, conocidos por sus procedimientos acuosos, en los cuales se emplean matas y consorcios microbianos involucrados en la remediación de efluentes (Jaramillo y Flores, 2012).

2.15.1 Generalidades

Los humedales se utilizan como alternativa para la remoción de contaminantes presentes: en efluentes, aguas de regadío, líquidos residuales que se encuentran en los vertederos y residuos de pozas sépticas (Jaramillo y Flores, 2012).

Las actividades humanas dan origen a diferentes procesos de separación dependiendo de lo que se desea remover:

- **Eliminación mecánica:** mayor eficacia física en la sustracción de sustancias nocivas asociados con componentes particulados.
- **Sustracción biológica:** remoción de contaminantes por acción de la vegetación.
- **Eliminación química:** el proceso de remoción químico más importante es la absorción, que da lugar a la retención a corto plazo o la inmovilidad a largo plazo de varios tipos de contaminantes (Jaramillo y Flores, 2012).

2.15.2 Tipos de humedales

Según Arias et al. (2010), hay dos variedades de humedales artificiales perfeccionados para la remoción de contaminantes de efluentes a saber: flujo superficial y flujo sub superficial.

a. Humedales flujo superficiales (HFS)

Es un canal constituido por un sustrato impermeable con una película de agua en contacto con el aire, en el que se siembran con matas arraigadas y un nivel de agua de 10 hasta 60 cm. El procedimiento ocurre al transportarse el agua por acción de raíces y tallos de la vegetación. Estos HS, pueden clasificarse según el tipo plantas. En este sentido CIEMA (2005) reportado en (Arias et al. 2010), los divide en dos sistemas:

- **Hidrofítas flotadoras:** Formado por estanques que presentan bajos niveles de agua equipados con matas flotantes.

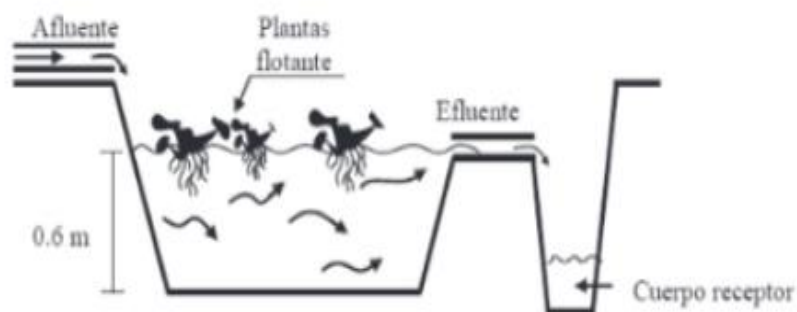


Figura 15. HFS con plantas acuáticas flotantes
Fuente: CIEMA (2005) en (Arias et al. 2010).

- **Hidrofítas inmersas:** Conformado por estanques con niveles de aguas superficiales y matas acuáticas sembradas, y mismas que se encuentran totalmente

inmersas macrófitas en el agua contenida en este sistema. Estas plántulas se desarrollan perfectamente en este medio, siempre y cuando tengan OD, por tanto, no aplican en aguas secundarias con elevada carga orgánica, por la desintegración por microorganismos confiere estados conducentes a falta casi total de oxígeno. (ver figura 16)

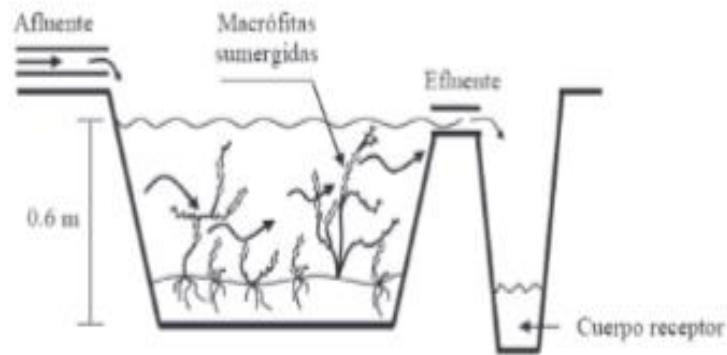


Figura 16. HFS con plantas sumergidas
Fuente: CIEMA, 2005 en (Arias et al. 2010)

b. Humedales flujo subsuperficiales (HFSS)

El HFSS, empleando plantas acuáticas arraigadas en el suelo constan de un tamiz vivo, con relleno filtrante de material esponjoso como: arena, gravilla o pedrusco volcánico, que actúa como sustrato, y en este medio se trasplantan las plantas hidrófilas, las mismas que ocupan la parte superficial de la cama filtrante, de esta forma el agua excedente tiene un tratamiento previo, transfieren de forma horizontal y vertical al sustrato, en estos sistemas el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio granular (Arias et al.2010).

- **De flujo subsuperficial horizontal (HFSSH):** en esta clase de humedal las aguas secundarias circulan lentamente y en forma horizontalmente desde el ingreso al recipiente, pasando por el sustrato hasta la zona de final de captación de las mismas. (ver figura 17)

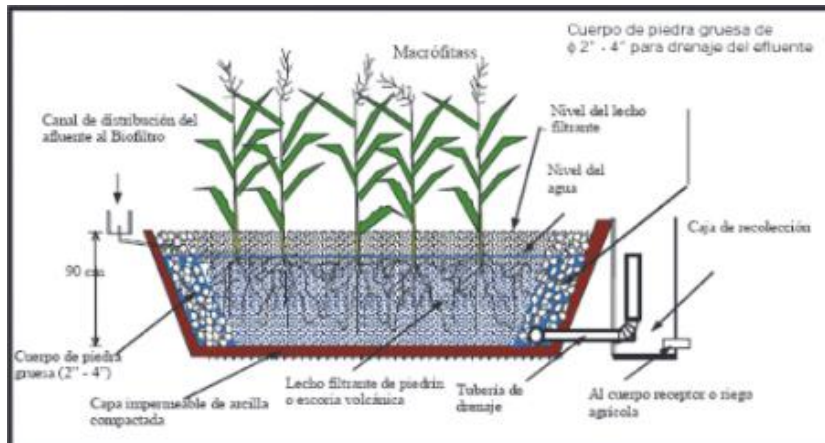


Figura 17. HFSSH

Fuente: CIEMA, 2005 en (Arias et al. 2010).

- **De flujo subsuperficial vertical (HFSSV):** en este sistema, el agua con tratamiento previo, se reparte en forma homogénea y discontinua, en el sustrato que contiene las plantas acuáticas y posteriormente por percolación pasa a la zona de captación (Arias et al. 2010).

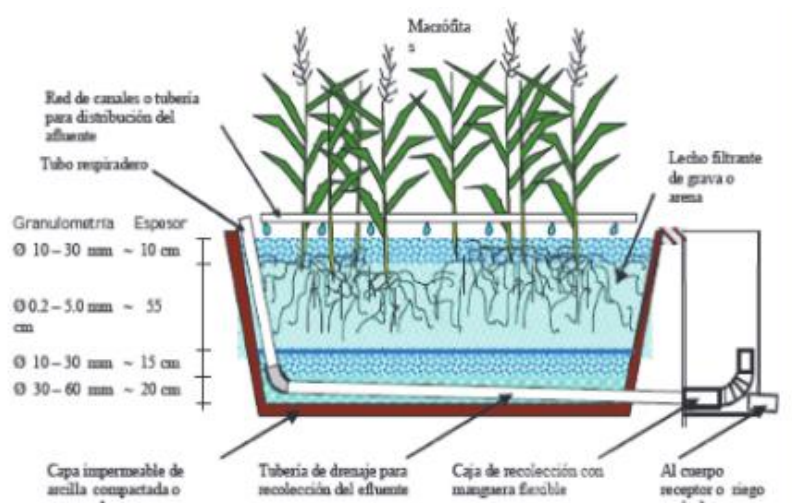


Figura 18. HFSSV

Fuente: CIEMA, 2005 en (Arias et al. 2010).

2.16 Reglamentos de TULAS para el vertido de aguas residuales

Según el Libro VI, Anexo I del Texto Unificado de Legislación Ambiental (TULAS) las descargas a un cuerpo receptor (agua dulce), cumplirán la exigibilidad ambiental de esta norma, propuesta en la tabla 8.

Tabla 8. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce

Parámetros	Expresado	Unidad	Límite máximo permisible
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	D.B.O ₅	Mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno	D.Q.O	Mg/l	250
Fósforo Total	P	Mg/l	10
Nitratos + Nitritos	Expresado como Nitrógeno (N)	Mg/l	10,0
Potencial de hidrógeno	pH		5-9
Sólidos totales	ST	Mg/l	1600
Turbiedad	Unidades nefelométricas de turbiedad	NTU	100,0

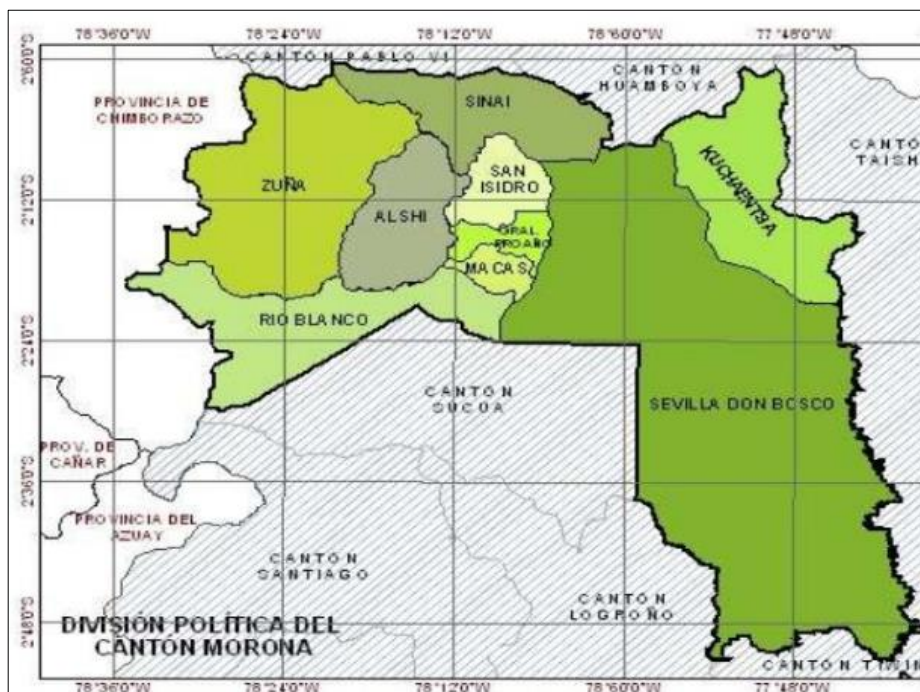
Fuente: (Texto Unificado de Legislación Secundaria Ambiental; TULAS, MAE., 2005)

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Zona de estudio

La investigación fue desarrollada en la provincia Morona-Santiago, cantón Morona, parroquia San Isidro, propiedad cafetalera de la fundación ATASIM.



Mapa 2. Ubicación político administrativa de la zona de estudio

Fuente: Departamento de Planificación del Municipio del cantón Morona en (Noguera, 2009)

Las coordenadas UTM del sitio en que se realizó el experimento son

Y	X
9755398,30 N	815259,92 S

Fuente: (Google Earth Pro, 2017)

Localizada en la zona 17 M. Ver figura 19.

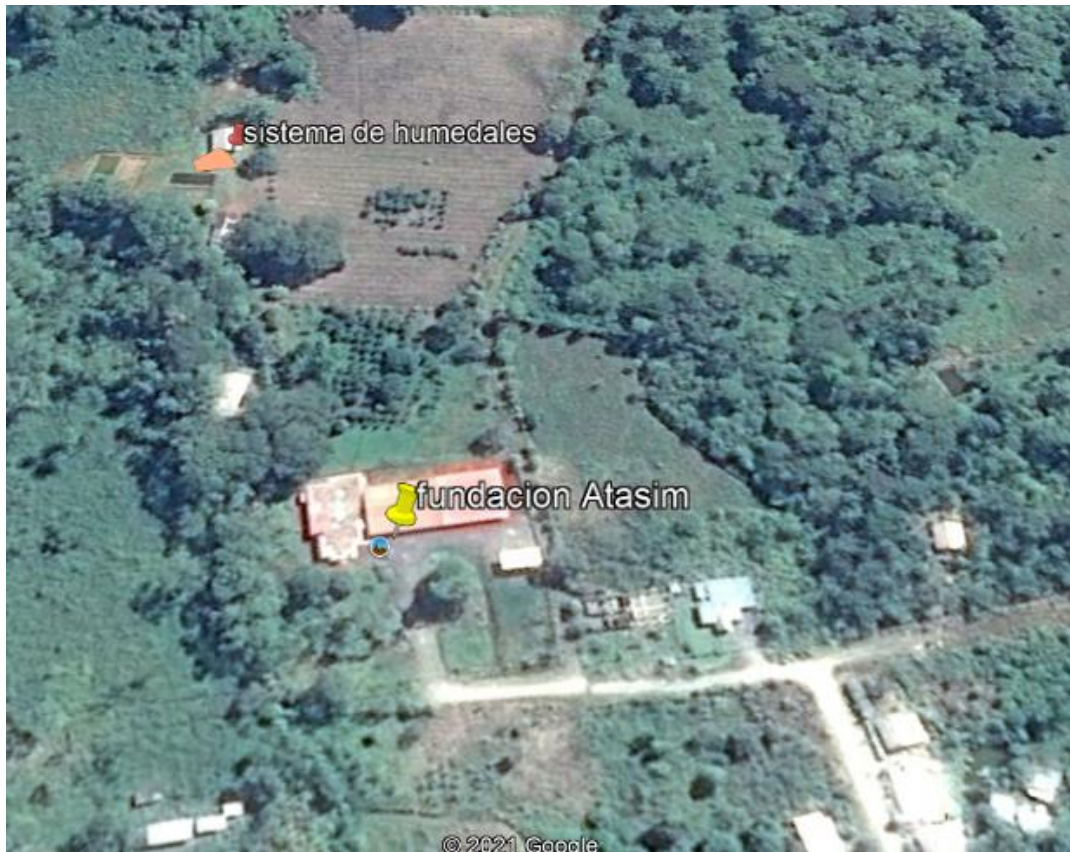


Figura 19. Zona de estudio
Fuente: (Google Earth Pro, 2017)

El área de estudio se encuentra a 1155 ms.n.m., presenta un entorno cálido-húmedo, con una variación térmica entre los 18 y 22 °C; siendo el promedio 20,68 °C (EcuRed, 2014). Y su precipitación media anual es 3,037mm, la evapotranspiración diaria es de 3,03 mm; la nubosidad alcanza en promedio el 55,14 %. La humedad relativa es del 87,05% INAMHI 2014 en (Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Morona Santiago, 2011).

3.2 Materiales

3.2.1 Materiales Físicos

- Tanques plásticos
- Manguera de conducción
- Llaves de paso
- Palas
- Fundas de polietileno negras
- Vasos
- Tijera podadora
- Teflón

- Arena
- Medidor de pH digital
- Higrómetro
- Botellas ámbar de vidrio de 1000 ml
- Grava

3.2.2 Materiales químicos

- Aguas mieles

3.2.3 Materiales biológicos

- Plantas de *Eleocharis sp.*;
- Plantas de *Cyperus luzulae*
- Plantas de *Eichhornia crassipes*
- Agua
- Aguas mieles

3.3 Desarrollo Metodológico

El presente estudio empleó metodologías de investigación cuantitativa, de tipo experimental de alcance exploratorio. Las variables analizadas se presentan a continuación.

Tabla 9. Tratamientos en estudio

Factores en estudio	Niveles
A: Vegetales para fitorremediación	T ₁ : <i>Eichhornia crassipes</i> (Jacinto de agua, sin sustrato) T ₂ : <i>Eleocharis sp.</i> (Junco) con sustrato T ₃ : <i>Cyperus luzulae</i> (coquito) con sustrato T ₀ con sustrato
B: Tiempo de retención	B0: 0 días B1: 5 días B2: 14 días B3: 19 días

En cumplimiento a los objetivos específicos se desarrolló la siguiente metodología:

3.3.1 Para cumplir el objetivo específico 1:

Diseñar e implementar un sistema piloto de humedales artificiales para el tratamiento de aguas mieles”, se realizaron las siguientes actividades.

Fase preparatoria:

La planta de tratamiento se implementó en una construcción rústica existente en el predio de la fundación ATASIM, que fue adecuada para la investigación; sustituyéndose el 50% de planchas de zinc por plástico de invernadero, con el fin de garantizar el acceso a horas luz (fotoperiodo), ver figura 20.



Figura 20. Adecuación de construcción para el estudio

Se procedió a la nivelación del suelo. (Ver figura 21)



Figura 21. Nivelación del terreno

Fase de ejecución:

Se diseñó y construyó las unidades piloto adaptado al modelo propuesto por Sherwood C. y Reed (Lara, 1999) expuesto por (Arias et al. 2010); cada unidad experimental está compuesta por tres subsistemas de flujo. Para la construcción de las unidades piloto se realizó el siguiente procedimiento:

Se dividieron seis tanques de polietileno de 200 litros mediante cortes longitudinales obteniéndose 12 sub unidades. (Figura 22)



Figura 22. División de tanques de polietileno

-Se estructuró cada humedal con tres medios tanques (subsistemas a, b y c). Figura 23



Figura 23. Implementación de subsistemas

-Posteriormente se realizaron las conexiones respectivas. Ver Figura 24.



Figura 24. Conexiones entre sistemas

- Cada sistema de humedales (tratamientos) estuvo conformado por tres subsistemas. Por lo tanto, los cuatro sistemas de humedales fueron conectados a un tanque de 1000 litros (l), en el que se recibió aguas mieles. Ver figura 25



Figura 25. Subsistemas conectados a tanque receptor de 1000 l.

- Cada sistema de humedal fue colocado estratégicamente de tal manera que se garantice el paso del agua miel del tanque colector a cada sistema y a su vez cada subsistema fue montado con diferencia de altura de 20 cm aproximadamente (5% pendiente). Ver figura 25.
- Cada sub unidad (medio tanque) tiene una capacidad de 0.1 m^3 en el cual se colocó al fondo $0,035 \text{ m}^3$ de grava de tamaño promedio de $2,3 \times 1,48 \text{ cm}$ y $0,039 \text{ m}^3$ luego arena, infiriéndose, que cada tratamiento utilizó $0,12 \text{ m}^3$ de arena y $0,10 \text{ m}^3$ de grava empleados como medios filtrantes (ver anexo 1_cálculos de material pétreo), ver figura 26.



Figura 26. Colocación de grava y arena

3.3.2 Para cumplir el objetivo específico 2:

Analizar el efecto del *Eichhornia crassipes* (Jacinto de Agua), *Cyperus luzulae* (coquito) y *Eleocharis sp.* (junco) en la remoción de contaminantes de aguas mieles de *Coffea arabica*. Se desarrollaron las siguientes actividades:

Fase preparatoria

Una vez construido el sistema de humedales artificiales se procedió al llenado de material pétreo previamente lavado según los diferentes tipos de tratamiento. Ver figura 27



Figura 27. Lavado de grava

Para el tratamiento T_0 definido como el tratamiento testigo se colocó la arena y grava en los volúmenes antes indicados. (ver figura 26)

Para el tratamiento T_1 *Eichhornia crassipes* por ser una macrófita acuática flotante se colocó directamente al agua miel proveniente del tanque receptor 180 litros, en donde se trasplantaron 24 plantas de *Eichhornia crassipes* por cada subsistema, sumando 72 plantas en este tratamiento.



Figura 28. Colocación de agua miel con 72 plantas *Eichhornia crassipes*

Para el tratamiento T₂ con *Eleocharis sp.* (Junco) de la misma manera se colocó en cada subsistema arena y grava según los volúmenes descritos anteriormente. Ver figura 29.



Figura 29. Colocación de grava y arena y 72 plantas *Eleocharis sp.* (Junco)

Para el tratamiento T₃ *Cyperus luzulae* (coquito) de la misma manera que el tratamiento dos se distribuyó la grava y la arena. (Ver figura 26).

Identificación y recolección de especies vegetales:

Las especies *Eleocharis sp.* y *Cyperus luzulae* fueron identificadas y se recolectaron 100 plantas de cada especie en la parroquia San Isidro, las mismas que fueron trasplantadas en fundas (4 x 8 pulg) de polietileno negras durante ocho días y colocadas bajo umbráculo, las mismas que tuvieron un prendimiento del 80%. Ver figura 30.



Figura 30. Recolección e Identificación de especies: *Cyperus luzulae* y *Eleocharis sp.*

Las plantas macrófitas *Eichhornia crassipes*, fueron recolectadas en Cuenca, desde humedales naturales, las cuales fueron trasladadas en bolsas plásticas con agua, al lugar de la investigación. Ver figura 31.



Figura 31. Recolección y traslado de *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua)

Fase de ejecución

Para el tratamiento 2 (T₂) se procedió a trasplantar en cada subsistema 24 plantas de *Eleocharis sp.* (Junco), empleándose, por tanto, 72 plantas en este tratamiento. Ver figura 32.

Similarmente para el tratamiento 3 (T₃) se trasplantaron en cada subsistema 24 plantas de *Cyperus luzulae*, utilizándose 72 plantas en este tratamiento. Ver figura 32.

Para el tratamiento 1 (T₁) se emplearon 72 plantas *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua), al ser plantas con parénquima aerífero (flotantes) se colocaron directamente en el agua miel. Ver figura 32.



Figura 32. Planta de tratamiento

El volumen de aguas mieles derivadas de beneficio húmedo del café correspondiente a 85 kg por semana de café con pulpa sin cáscara, dejándole fermentar por un tiempo de 20 horas requiere de 540 litros de agua resultantes de los tres lavados.

Estas aguas mieles fueron colocados en el tanque principal de sistema de humedales que estuvo ubicado en la parte superior del mismo con un desnivel de un metro con relación al nivel del suelo. Ver figura 32

A los tres días del trasplante definitivo, en cada subsistema según el tratamiento respectivo se distribuyen las aguas mieles en función en los volúmenes contenidos en la tabla 10.

Tabla 10. Volumen de agua miel utilizado en el experimento

Tratamiento	Volumen (litros)
T ₁ : <i>Eichhornia crassipes</i> (Jacinto de agua)	180 litros
T ₂ : <i>Eleocharis sp.</i> (Junco)	120 litros
T ₃ : <i>Cyperus luzulae</i> (coquito)	120 litros
T ₀ : Con sustrato	120.litros

Toma de muestras y análisis de laboratorio

Se tomaron muestras al inicio, 5, 14 y 19 días de realizado el experimento para la determinación de parámetros estudiados: sólidos totales (ST), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno DQO, Nitratos, Nitritos, Potencial Hidrógeno pH, Fósforo Total y Turbidez.

Las muestras fueron recogidas a la salida de cada tratamiento (subsistema C) y etiquetadas según el protocolo de muestreo propuesto por (Calderón, 2015) empleándose la muestra simple o puntual por el método de muestro manual.

Se procedió a rotular cada envase de vidrio ámbar (volumen 1 litro), empleando una etiqueta, con una leyenda que contenía información sobre el número tratamiento, fecha, hora, lugar de recolección y nombre del recolector; y sobre ésta se colocó cinta adhesiva, con el fin de evitar confusiones en la identificación de las muestras.

Luego, en el campo se tomó 1000 ml de agua miel a la salida de cada humedal artificial, es decir, se contó con cuatro frascos en cada muestreo. Como precaución en cada frasco, se dejó un espacio de aire equivalente a aproximadamente 1% del volumen, es decir, 10 ml, por tratarse de compuestos orgánicos para permitir la expansión térmica durante su transporte. (Calderón, 2015).

A su vez cada frasco fue envuelto con papel film, como medio para evitar que el agua miel se derrame, y también para evitar rozamiento entre los frascos, seguidamente estos fueron colocados en un cooler con hielo para garantizar su conservación y enviados por transporte terrestre al CIITT.

El análisis de los parámetros físico químicos fueron realizado en el Laboratorio "*Centro de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología de la Universidad Católica de Cuenca (CIITT)*", empleando el Standar Methods Ed. 23, realizados por el Ing. Carlos Matovelle Bustos. Director de laboratorio de aguas.

Para el análisis físico-químico, se tomó 1000 ml de agua miel por tratamiento, estos envases fueron colocados en un cooler con hielo para garantizar su conservación y enviados por transporte terrestre al CIITT, en el experimento se tomaron en total cuatro muestras por tratamiento.



Figura 33. Muestras de laboratorio

Toma de datos

Se precisa que los datos de pH de los distintos tratamientos fueron registrados cada 2 días, empleándose un medidor de pH digital. Ver figura 34



Figura 34. Toma de datos pH

3.3.3 Para cumplir el objetivo específico 3:

Al final del experimento, es decir, a los 19 días se recopilaron datos sobre la longitud y número de raíces en las tres especies estudiadas; número y largo de tallos o brotes: para *Eleocharis sp.* y *Eichhornia crassipes* adicionalmente se contabilizó la cantidad de hojas y el largo del peciolo para analizar la adaptación de estas especies a aguas mieles del café. Ver figura 35.



Figura 35. Instrumentos utilizados para la toma de datos en plantas macrófitas

Análisis e interpretación de datos estadísticos

Se utilizó el método estadístico (ADEVA) y el análisis de comparación múltiple de medias empleando la Prueba de la Mínima Diferencia Significativa (MDS). Con el fin de determinar el nivel de significancia, se aplicó la prueba del Tukey 5% y Kolmogorov. Los datos se registraron en el programa SPSS.

Para evaluar la eficiencia de remoción en los distintos tratamientos, se usó el porcentaje de remoción (% R), entendido como la aptitud de cada planta, para remediar o disminuir una porción de la densidad de sustancias tóxicas presente en efluentes (Castañeda y Flores, 2014). misma que se calcula aplicando la siguiente formula:

$$\%R = \frac{((\text{Cont}(i) - \text{Cont}(f)) * 100)}{\text{Cont}(i)}$$

Dónde: Cont(i)= Contenido inicial

Cont(f)= Contenido final

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Datos obtenidos en el laboratorio

Los datos alcanzados en la investigación de laboratorio, correspondiente a aguas mieles originadas del lavado del café (muestra inicial) en Fundación ATASIM.

Las características físicas y química obtenidas, se detallan en la tabla 11 y advierten que las aguas mieles tienen un alto contenido de materia orgánica (MO), sólidos totales (ST), nitratos, fósforo, DQO y DBO₅, turbidez y pH ácido.

Tabla 11. Resultados de parámetros físico químico de aguas mieles Inicial

PARÁMETROS EN AGUA MIEL	CANTIDAD	UNIDAD	LIMITES PERMISIBLES
DQO	2452	mg/l	250
DBO ₅	1935	mg/l	100
Sólidos totales	455	mg/l	1600
Nitratos	15,8	mg/l	10
Nitritos	8,45	mg/l	10
Fósforo total	13,65	mg/l	10
Turbidez	252,5	NTU	100
pH	2,87		5-9

Los parámetros analizados en el laboratorio a los 5, 14 y 19 días, se detallan en las tablas 12, 13 y 14.

Tabla 12. Resultados de parámetros físico químico de aguas mieles (cinco días)

PARÁMETRO	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	LIMITES PERMISIBLES
DQO	2228,5	2634,5	1386	2314,5	250
DBO ₅	1842,5	1910	1147,5	1805	100
Sólidos totales	432,5	392,5	214	431,5	1600
Nitratos	15,25	13,15	11,3	12,55	10
Nitritos	8,3	7,95	5,47	8,65	10
Fósforo total	12,7	13,15	11,15	12,4	10
Turbidez	220,5	231	150	160	100

Tabla 13. Resultados de parámetros físico químico de aguas mieles. 14 días

Parámetro	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	Límites permisibles
DQO	2105	2302,5	1095	2047,5	250
DBO₅	1752,5	1652,5	852,5	1752,5	100
Sólidos totales	395	347,5	189,5	385	1600
Nitratos	13,15	11,15	9,35	11,2	10
Nitritos	6,63	6,4	4,35	7,79	10
Fósforo total	11,15	10,67	9,02	11,1	10
Turbidez	152,5	179,5	89,5	122,5	100

Tabla 14. Resultados de parámetros físico químico de aguas mieles.19 días

Parámetro	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	Límites permisibles
DQO	2000	1905	833,5	1806	250
DBO₅	1707,5	1631,5	708,5	1542	100
Sólidos totales	370	295	132,5	246,5	1600
Nitratos	12,3	10,15	5,35	7,78	10
Nitritos	5,45	5,93	3,25	5,53	10
Fósforo Total	11,05	9,42	5,55	8,82	10
Turbidez	121	134	42,5	92,5	100

Los datos de pH, se presentan en la tabla 15, mismos que se registraron cada dos o tres días, por tanto, el análisis de este parámetro se realizó en forma independiente.

Tabla 15. Resultados de parámetros pH de aguas mieles 19 días

Fecha	T ₀	T ₁ (Jacinto)	T ₂ (<i>Eleocharis</i>)	T ₃ (coquito)	Límites permisibles
29/9/2020	2,87	2,87	2,87	2,87	5-9
30/9/2020	3,86	3,21	4,46	3,76	5-9
2/10/2020	4,24	3,22	4,44	4,18	5-9
4/10/2020	4,26	3,20	4,49	4,26	5-9
6/10/2020	4,30	3,24	4,60	4,35	5-9
8/10/2020	4,41	3,32	4,66	4,38	5-9
11/10/2020	4,57	3,40	4,63	4,44	5-9
13/10/2020	4,63	3,50	4,66	4,50	5-9
15/10/2020	4,77	3,61	4,76	4,59	
18/10/2020	4,83	3,86	5,02	4,95	

Se efectuó el ADEVA en función de datos obtenidos por muestra enviada al laboratorio; es decir, para cada una de las muestras estudiadas se aplicó el procedimiento de análisis de varianza examinado medias diferentes y estimando el grado de diferencia utilizando el método de Mínima Diferencia Significativa (MDS).

La información presentada en la tabla 16 reporta datos del ADEVA y de comparación múltiple de medias de tratamientos para cada parámetro estudiado, en la muestra 1 tomada a los cinco días de iniciado el experimento. Para todas las variables se detectó efecto significativo de tratamientos dado que la significancia es menor a 0,05. ($P < 0,05$), señalando diferencias entre al menos dos medias de tratamiento. Los coeficientes de variación (CV) de todas las variables son relativamente bajos, por tanto, los resultados son confiables.

Tabla 16. Resultados del análisis de varianza y comparación múltiple de medias (MDS) al 5%.
Muestra 1, a los cinco días

VARIABLE	TRATAMIENTOS				VALOR F	VALOR P	CV (%)
	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃			
DQO	2228,5 c	2634,5 a	1386,0 d	2314,5 b	612	0,0000	1,42
DBO ₅	1842,5 b	1910,0 a	1147,5 d	1805,0 c	2691	0,0000	0,58
Sólidos Tot.	432,5 a	392,5 b	214,0 c	431,5 a	537	0,0000	1,73
Nitratos	15,3 a	13,2 b	11,3 c	12,5 b	65	0,0008	2,22
Nitritos	8,3 ab	7,9 b	5,5 c	8,7 a	231	0,0001	1,77
Fósforo Tot.	12,7 ab	13,2 a	11,2 c	12,4 b	53,5	0,0011	1,34
Turbidez	220,5 b	231,0 a	150,0 d	160,0 c	5451	0,0000	0,42

Medias de tratamiento con la misma letra, en cada fila, no tienen diferencias significativas, según MDS al 5%.

En la tabla 17, se revelan respuestas correspondientes al análisis de varianza y comparación múltiple de medias de tratamientos para cada componente investigado en la muestra 2 tomada a los 14 días. Para todas las variables se detectó efecto significativo de tratamiento dado que la significancia es menor a 0,05 ($P < 0,05$), estableciendo la existencia de diferencias entre al menos dos medias de tratamiento. Los coeficientes de variación (CV) de todas las variables son relativamente bajos, concluyéndose que los resultados son confiables.

Tabla 17. Resultados del análisis de varianza. Prueba MDS al 5%. Muestra 2 a los 14 días.

Variable	Tratamientos				Valor F	Valor P	CV (%)
	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃			
DQO	2105,0 b	2302,5 a	1095,0 d	2047,5 c	18628	0,0000	0,30
DBO₅	1752,5 a	1652,5 b	852,5 c	1752,5 a	30400	0,0000	0,24
Sólidos Tot.	395,0 a	347,5 b	189,5 c	385,0 a	644	0,0000	1,61
Nitratos	13,2 a	11,2 b	9,4 c	11,2 b	257	0,0000	1,22
Nitritos	6,6 b	6,4 b	4,4 c	7,8 a	361	0,0000	1,69
Fósforo Tot.	11,2 a	10,7 b	9,0 c	11,1 a	91,1	0,0004	1,41
Turbidez	152,5 b	179,5 a	89,5 d	122,5 c	462	0,0000	1,87

Medias de tratamiento con similar signo, en cada fila, no varían en forma significativa. DMS al 5%.

En la tabla 18, se exponen los resultados del ADEVA por elemento estudiado, en la muestra 3 tomada al fin del experimento, es decir, a los 19 días. Para todas las variables se detectó efecto significativo de tratamiento, dado que la significancia es menor a 0,05 ($P < 0,05$), indicando la existencia de diferencias entre al menos dos medias de tratamiento. Los coeficientes de variación (CV) de todas las variables son relativamente bajos, deduciéndose de ello la confiabilidad de los resultados.

Tabla 18. Resultados del análisis de varianza y comparación múltiple de medias. Prueba MDS, al 5%. Muestra 3 a los 19 días.

Variable	Tratamientos				Valor F	Valor P	CV (%)
	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃			
DQO	2000,0 a	1905,0 b	833,5 d	1806,0 c	8170	0,0000	0,52
DBO₅	1707,5 a	1631,5 b	708,5 d	1542,0 c	11531	0,0000	0,44
Sólidos Tot.	370,0 a	295,0 b	132,5 d	246,5 c	89,5	0,0004	5,71
Nitratos	12,3 a	10,2 b	5,4 d	7,8 c	498	0,0000	2,14
Nitritos	5,4 b	5,9 a	3,3 c	5,5 b	581	0,0000	1,41
Fósforo Tot.	11,1 a	9,4 b	5,6 d	8,8 c	601	0,0000	1,53
Turbidez	121,0 a	134,0 a	42,5 c	92,5 b	48,9	0,0013	8,41

Medias de tratamiento con similar signo, en cada fila, no presenta diferencia significativa. Prueba MDS al 5%.

De la información numérica especificada en las tablas 16, 17 y 18 del análisis de varianza, se realiza la interpretación de cada parámetro estudiado que se presenta a continuación:

4.2 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Los datos reportados a los cinco días de iniciado el experimento en la tabla 16 para **DQO**, según la Prueba MDS destaca que los cuatro tratamientos están claramente discriminados o separados (letras diferentes), correspondiendo a (T_1) *Eichhornia crassipes* el mayor promedio (media igual a 2634,5 mg/l) y a *Eleocharis sp.* (T_2) (media igual a 1386,0 mg/l) el menor. Para esta misma variable o parámetro estudiado a los 14 días los cuatro tratamientos están diferenciados (letras diferentes) presentando el *Eichhornia crassipes* un mayor contenido de DQO (2302,5 mg/l) en tanto que *Eleocharis sp.* (T_2) presenta el menor contenido de DQO (1095,0 mg/l) Ver tabla 17. De manera similar a los 19 días, para **DQO**, indica que los cuatro tratamientos están claramente separados, correspondiendo al Testigo (T_0) el mayor promedio (2000,0mg/l) y a *Eleocharis sp.* (T_2) el menor contenido con 833,5 mg/l, de tal forma que hay una reducción de DQO de un 66% en relación al valor inicial de la agua miel procedente del lavado del café. Ver tabla 18.

La tabla 19 exhibe la transformación de la DQO en función del tiempo de retención precisándose, que conforme pasa el tiempo el oxígeno va consumiéndose y por ello se evidencia su disminución en la muestra de agua, como consecuencia de lo anterior la menor Demanda Química de Oxígeno se observa al final del experimento. Es decir, a mayor tiempo transcurrido (19 días) se reduce la concentración del DQO de las aguas mieles en todos los tratamientos estudiados.

Tabla 19. Prueba media de Tukey al 5%. Para DQO en aguas mieles, *Coffea arabica* utilizando macrófitas con respecto al tiempo de retención.

Tiempo de retención	N	Sub conjunto o rangos			
		d	c	b	a
19 días	4	1636,13			
14 días	4		1887,50		
5 días	4			2140,88	
Inicial	4				2452,50

En la figura 36 se aprecia al final del experimento (19 días), como la especie *Eleocharis sp.* (T_2) es la que más disminuye la DQO, en función del tiempo de retención logrando valores de 833,5 mgO₂/l; es decir, removi6 el 66% de DQO con relación al contenido de este parámetro en aguas mieles de café inicial (2452,5 mgO₂/l; El segundo lugar en remoción de DQO alcanzó *Cyperus luzulae* (T_3) con 1806 mgO₂/l disminuyendo la concentración de DQO en un 26%, el tercer lugar fue para *Eichhornia crassipes* (T_1) con 1905 mgO₂/l. con el 22% de descontaminación y finalmente el Tratamiento Testigo (T_0) presento el mayor valor DQO (2000 mgO₂/l con el 18%). Evidenciándose entonces que las

plantas macrófitas inciden favorablemente en la remoción del DQO; en función al tiempo de retención coincidiendo con Romero, Colín, Sánchez y Ortiz (2009) quienes advierten en “*humedales artificiales (HA), la capacidad de remoción se debe a los efectos combinados entre el tiempo de retención hidráulica, la acción filtrante del sustrato para retener sólidos suspendidos del agua y la actividad biológica del sistema*”. Pag 162.

Consecuencia de ello *Eichhornia crassipes*, si bien no tuvo medio filtrante (grava y arena) incluso logra remover el 22%; en tanto, el testigo (T_0) solo disminuye el 18% de la carga contaminante; por tanto; se infiere que las raicillas de las macrófitas estudiadas sirven de soporte o hábitat de microorganismos, al tiempo de su contribución de oxígeno hacia la rizosfera, factores entre otros, que incrementan la participación de bacterias que se desarrollan en presencia o ausencia de oxígeno, y bacterias que sobreviven y se multiplican en ambientes sin oxígeno, pegadas al sistema radical o tallos subterráneos de especies vegetales, en función del lapso de retención hidráulico y el efecto filtrante del sustrato para atrapar sólidos suspendidos obtienen un porcentaje de remoción del 46,92 % en un estudio desarrollado por Palta y Morales (2013) con poaceas; en tanto, que *Eleocharis sp.* logra una remoción del 66% superior al estudio analizado; sin embargo, todos los tratamientos superan el límite máximo permisibles 250 (mg/l) determinado en la norma TULAS para ser vertido en el cauce natural. (Texto Unificado de Legislación Secundaria Ambiental; TULAS, MAE., 2005), no obstante, resulta relevante en la remediación de aguas procedentes de la agroindustria del café.

La mayor eficacia de supresión de niveles de DQO en agua residual doméstica fue para *Cyperus ligularis* con una remoción del 92% y concuerda con lo conseguido por Leto, Tuttolomondo, La Bella, y Licata (2013), para *Cyperus alternifolius* en HCFSSH, quienes señalan la efectividad de este género de macrófitas en procesos de depuración con plantas durante tres meses; mientras que, es inferior en *Cyperus luzulae* utilizada en aguas mieles en este estudio, obtuvo una remoción del 46% de este parámetro, posiblemente debido a que las plantas presentaron un cambio de color de las hojas (amarillamiento-café) y marchitamiento general de la planta, que probablemente influyó en el proceso fotosintético. En tanto que, *Eleocharis sp.*, consiguió el 66% infiriéndose que se necesita mayor tiempo de retención, de los tratamientos estudiados, para alcanzar superiores niveles de remoción.

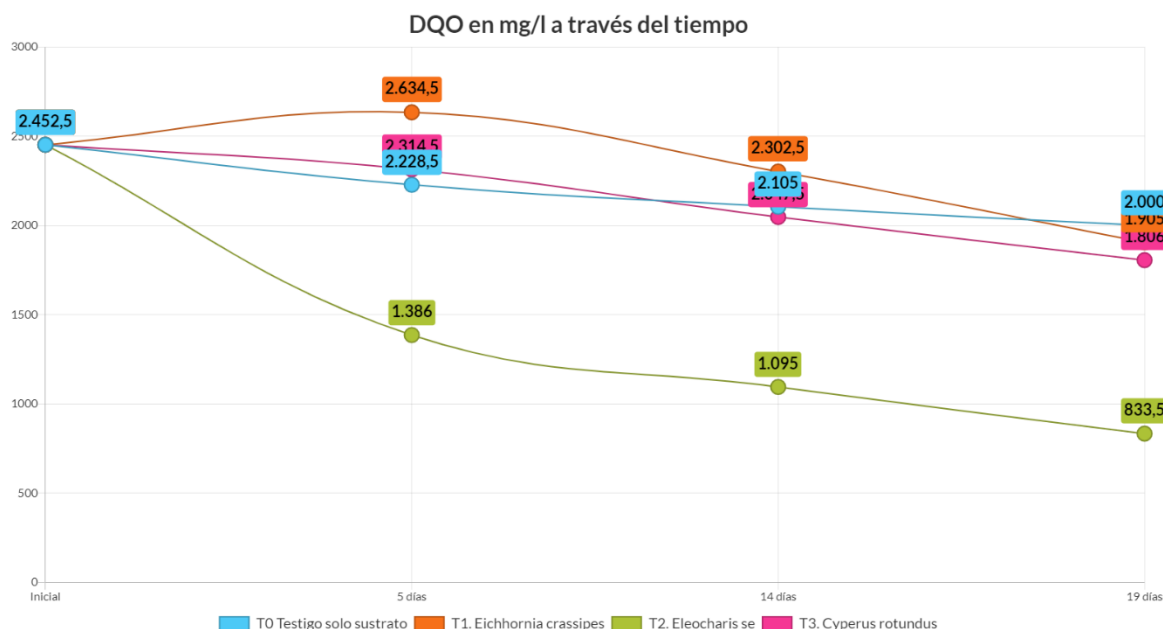


Figura 36. DQO en aguas mieles en *Coffea arabica* utilizando macrófitas con respecto al tiempo de retención

También se observó que la única especie que aumenta DQO, a los cinco días de iniciado el ensayo fue *Eichhornia crassipes* (T_1) con una media igual a 2634,5mg/l superior al valor inicial (2452,5) e incluso en este período hay presencia de moscas y de mal olor posiblemente por fermentación de azúcares que ocasionó mayor demanda de DQO y porque no contiene el medio filtrante, pero al día 19 disminuye la carga orgánica al 22% y el Tratamiento Testigo (T_0) “solo sustrato” obtiene elevados niveles de DQO con respecto al resto de tratamientos, deduciéndose que las macrófitas acuáticas flotantes actúan en la mejora de la calidad de aguas mieles, observándose que *Eichhornia crassipes* supera la remoción de DQO a los resultados obtenidos por (Niño, Aponte, Rodríguez, & Perico, 2018) que consigue el 10% de disminución con esta especie, en efluentes domésticos e industriales, originados por residentes de la localidad Tierra Negra, Bogotá.

4.3 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5)

El ADEVA expuesto en la tabla 16, a los cinco días para Demanda Biológica de Oxígeno indican que las especies vegetales fitoreguladoras, a través del tiempo se comportaron de manera diversa, encontrando diferencias altamente significativas entre tratamientos, en vista que la significancia es menor al 0,05. Para DBO_5 según el análisis MDS, muestra a los cuatro tratamientos claramente discriminados, correspondiendo a T_1 el mayor promedio (1910,0 mg/l) y a T_2 (1147,5 mg/l) el menor.

A los 14 días según la tabla 17 para DBO_5 los tratamientos Testigo (T_0) solo sustrato y *Cyperus luzulae* (T_3) no se diferencian entre sí, teniendo ambos iguales promedios

(1752,5 mg/l), siendo el mayor, y *Eichhornia crassipes* (T₂), con el menor valor 852,5 mg/l. Al final del experimento a los 19 días para DBO₅ el mayor promedio corresponde al Testigo T₀ (1707,5 mg/l) y para *Eleocharis sp.* (T₂) el menor promedio (708,5 mg/l). Ver tabla 18

Del análisis basado en Tukey al 95% de confiabilidad, para DBO₅ con respecto al tiempo de retención, se demuestra que a mayor tiempo de permanencia de las plantas macrófitas en aguas mieles, van consumiendo la materia biodegradable y por ello, disminuye su disposición en la muestra de agua, deduciéndose una relación indirecta a mayor tiempo de permanencia de las plantas estudiadas menor contenido de DBO₅. Se establece entonces la disminución progresiva de 1935 mg/l valor inicial de aguas mieles a 1397,37 mg/l, al final del experimento de DBO₅ (Ver tabla 20).

Tabla 20. Prueba media de Tukey al 5% para Demanda Biológica Oxígeno en aguas mieles de *Coffea arabica* utilizando macrófitas con respecto al tiempo de retención.

Tiempo de retención	N	Sub conjunto muestras o rangos			
		d	c	b	a
19 días	4	1397,37			
14 días	4		1502,50		
5 días	4			1676,25	
Inicial	4				1935,00

De los datos expuestos en la figura 37 se infiere que la planta *Eleocharis sp.*, conforme aumenta el tiempo disminuye la demanda biológica de oxígeno, es decir, que microorganismos como bacterias y hongos que se encuentra en simbiosis con las raíces de la especie vegetal mencionada, empiezan a degradar las sustancias orgánicas contenidas en aguas mieles, por ello existe una disminución del 63% (708,5mg /l) de DBO₅, en relación a la muestra inicial. (1935 mg/l), en correspondencia con Madsen y Robles (2014), citado por Ayala, Calderón, Rascón y Collazos (2018) quienes afirman que la disminución registrada de demanda bioquímica de oxígeno, ocurre por el consumo de la población microbiana asociada al sistema radicular, así también por el efecto del sustrato empleado en el experimento y por las especies macrófitas que incrementan el Oxígeno Disponible.

En este sentido, este estudio concuerda con Morales et al. (2020), quienes en la investigación “tratamiento de aguas mieles de café en la Provincia de Rodríguez de Mendoza, Perú”, logran elevados niveles de OD en el tratamiento (PM2) “Filtro físico” y en el Tratamiento (PM3) Filtro Biológico conformado por plantas de *Lemna minor* L. y de

Eichhornia crassipes, y aseguran que gracias al manto poroso y las plantas favoreció el aumento del oxígeno disuelto presente en aguas provenientes del lavado del café.

El segundo lugar, el consumo del DBO5 al final del experimento corresponde a *Cyperus luzulae* con el 20% (1542 mg/l). En tanto que, *Eichhornia crassipes* a los 19 días presenta una reducción del 16 % (1631 mg/l) y finalmente el testigo reduce la DBO5 en un 12 % (1707,5 mg O2/l), resultados que difieren de Ayala et al. (2018) quienes indican que la demanda bioquímica de oxígeno, por *Eichhornia crassipes* mermó en 84,72%, a las ocho semanas; en consecuencia la validez de la eliminación de este compuesto, está claramente vinculado al número de plantas, su área de cubrimiento y el fondo de trasplante, en el medio acuático y el tiempo para su remoción y sobre todo de la precipitación, debido a que el experimento llevado bajo cubierta impidiendo el ingreso de precipitación factor que incide en la concentración de DBO5.

Del análisis anterior expuesto, en comparación con los límites permisibles para DBO5 (100 mg/l) para su depósito en cuerpos de agua dulce según el TULAS, ningún tratamiento cumple con este parámetro probablemente debido a que se requiera un mayor tiempo para la reducción de sustancias contenidas en aguas originadas en el proceso de lavado del café.

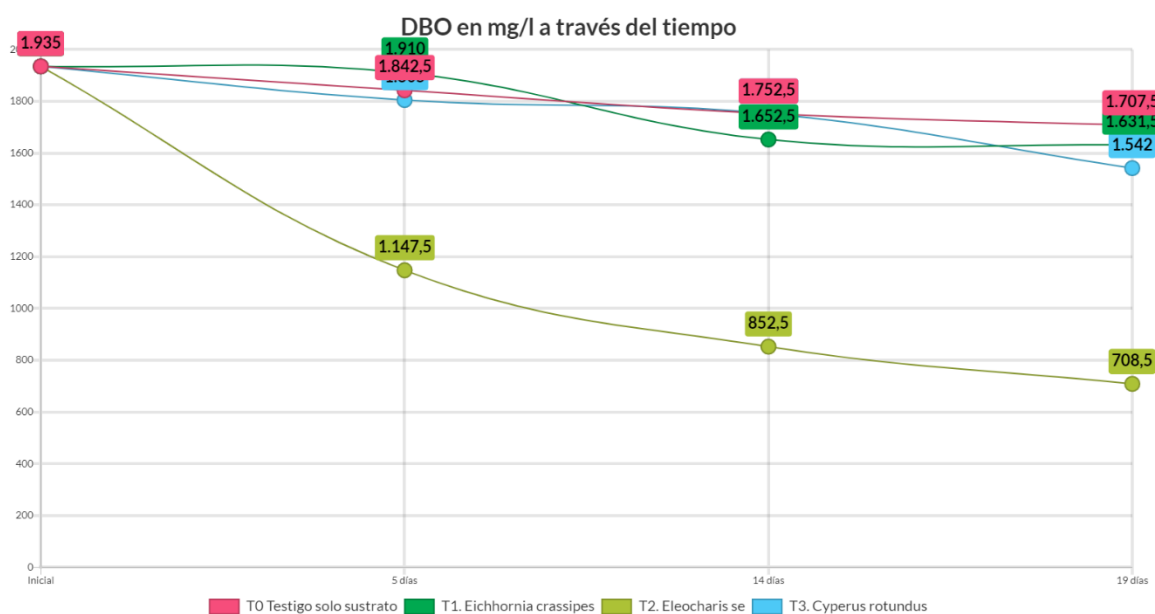


Figura 37. Demanda Biológica de Oxígeno en aguas mieles de *Coffea arabica* utilizando macrófitas acuáticas con respecto al tiempo de retención

4.4 Sólidos totales

De la información contenida en la tabla 16, para sólidos totales a los cinco días el análisis en de laboratorio revela que el mayor promedio de concentración corresponde al Testigo (T0) que registra 432,5 mg/l, pero no se diferencia de *Cyperus luzulae* (T₃) 431,5 mg/l; es decir, comparten el mismo rango (a). El menor promedio corresponde a *Eleocharis sp.* (T2) con 214,0 mg/l. A los 14 días el mayor promedio corresponde al Testigo (T0) 395,0 mg/l sin diferenciarse de T3 (385,0 mg/l) pues comparten el mismo rango (a) y el menor promedio corresponde a *Eleocharis sp.* (T2) que logra 189,5 mg/l. Ver tabla 17. Finalmente, a los 19 días del experimento el mayor promedio corresponde al Testigo T₀ (370,0 mg/l) y el menor promedio de concentración de sólidos totales corresponde a *Eleocharis sp.* T2 con 132,5 mg/l. Ver tabla 18.

Se evidencia que las distintas especies macrófitas utilizadas para la remoción de sólidos totales tuvieron un comportamiento diferenciado porque tiene distintos rangos según el ADEVA (a, b, c y d) debido a que la significancia es menor a 0,05. Análisis basado en Tukey al 95%, para sólidos totales revela que a mayor tiempo de permanencia de las plantas macrófitas en aguas mieles, se disminuye la cantidad de sólidos totales, fenómeno atribuido a la reducción de carga contaminante conforme se incrementa el número de días, debido a los procesos de fitorremediación logrados por las plantas dada la adaptación de éstas a las aguas mieles y a la aparición de raicillas (nuevas), como lo concluyen Suresh y Ranvishankar (2004) que en esta técnica actúa el metabolismos de plantas y microorganismos que cubren el sistema radical, eliminando los contaminantes o reduciendo su efectividad.

Como se precisa en la tabla 21 al final del experimento la cantidad de sólidos totales en promedio de tratamientos disminuye en un 43% la cantidad de sólidos totales en aguas mieles.

Tabla 21. Tukey al 5%, para sólidos totales en aguas mieles de *Coffea arabica* utilizando macrófitas acuáticas con respecto al tiempo de retención.

Tiempo de retención	N	d	Subconjunto		
			c	b	a
19 días	4	261,00			
14 días	4		329,25		
5 días	4			367,62	
Inicial	4				455,00

En la figura 38 se analiza el tiempo de retención y la cantidad media de sólidos totales en función de los tratamientos estudiados. Se aprecia como (T2) *Eleocharis sp.*, a los cinco días presenta una considerable disminución de sólidos totales (214 mg/l) y esta tendencia se mantiene hasta el final del experimento alcanza (132,5 mg/l), es decir logra una remoción del 71% de ST. Durante el tiempo evaluado el tratamiento Testigo T₀ se mantiene por encima del resto de tratamientos. La especie *Cyperus luzulae* se comporta de manera similar al tratamiento testigo, pero al final del experimento baja bruscamente los valores de ST, debido posiblemente a que cuenta ya con raíces e inicia la fotosíntesis.

El segundo lugar, en la retención de ST en función del tiempo corresponde a *Cyperus luzulae* con el 46% (246,5 mg/l). En tanto que, *Eichhornia crassipes* a los 19 días presenta una reducción del 35 % (295 mg/l) y finalmente el testigo reduce la cantidad de ST en un 19 % (370 mg/l).

Con referencia a lo anterior, se establece según los límites permisibles determinado en la normativa ecuatoriana para ST (1600 mg/l) para su descarga en cuerpos de agua dulce. Bajo esta consideración, sólidos totales presentes en aguas mieles podrían ser vertidos directamente sin tratamiento alguno. Siendo necesario precisar que en todos los tratamientos hubo una disminución de ST significativa debido a su retención en las raíces de las macrófitas, en tanto que en el testigo si bien hay una disminución menor de ST por el efecto del medio filtrante (grava y arena) como lo señalan (Arias et al. 2010) que los medios filtrantes logran retener mayormente y asentar los sólidos totales, debido a los poros y tamaño del sustrato utilizado, se evidencia que además de estas propiedades del medio filtrante, el efecto positivo de las plantas macrófitas en la disminución del contenido de sólidos totales, resultado inferior a los determinados en el estudio desarrollado por (Arias et al. 2010) para ST en los que usaron dos materiales filtrantes y tres plantas, dando como

resultado porcentajes distintos de remoción superiores al 80% de ST contaminantes del aguas, originada en una finca porcina.

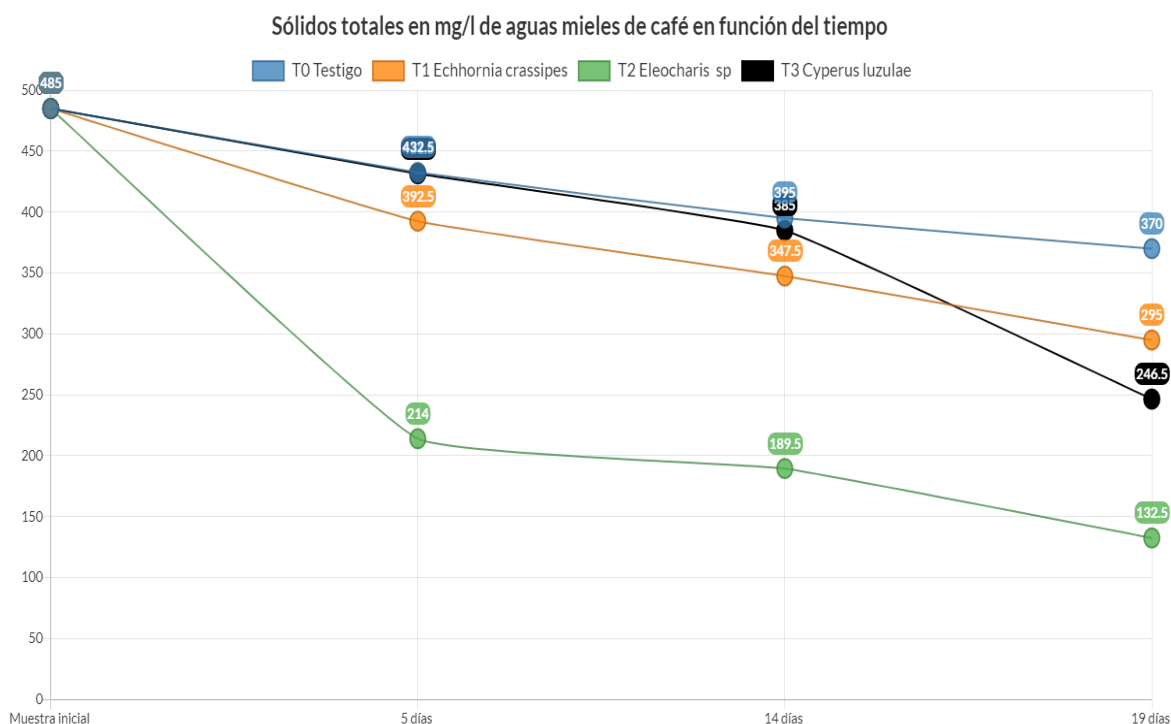


Figura 38. Sólidos totales en aguas mieles de *Coffea arabica* utilizando macrófitas acuáticas con respecto al tiempo de retención.

4.5 Presencia de nitratos en aguas mieles de café

De los datos expuestos en el ADEVA tabla 16 para nitratos a los cinco días el análisis de laboratorio explica, el mayor promedio corresponde al Testigo T0 (15,3 mg/l) y el menor a (T2) *Eleocharis sp.* con 11,3 mg/l, en tanto, que *Eichhornia crassipes* (T1) y *Cyperus luzulae* (T3) no se diferencian entre sí por compartir el mismo rango (b). En base al ADEVA expresado en la tabla 17 a los 14 días, el mayor promedio del contenido de nitratos corresponde al Tratamiento Testigo T0 (13,2mg/l) y el menor a *Eleocharis sp.* (T2) con 9,4 mg/l). En el mismo orden de ideas *Eichhornia crassipes* (T1) y *Cyperus luzulae* (T3) no se diferencian entre sí. A los 19 días el mayor promedio corresponde al Testigo T0 (12,3 mg/l) y el menor a T2 alcanzando un valor de 5,4 mg/l, entonces *Eleocharis sp.* al final de experimento consigue la disminución de nitratos en un 66%. Ver tabla 18.

La información presentada en la tabla 22 revela que la presencia de nitratos tiene un comportamiento similar en función del tiempo de retención a las variables estudiadas anteriormente, a medida que pasa el tiempo la presencia de nitratos van disminuyendo, observándose los valores más bajos al final del experimento. Precisándose que cada tratamiento analizado está en función directa con el tiempo, por tanto, no es independiente.

Del análisis basado en la prueba de Tukey al 5% para nitratos contenidos en aguas mieles de café en base al tiempo de análisis, explica que a mayor tiempo de retención de las plantas macrófitas en éstas, se reduce la concentración de nitratos. Además, se determina que el contenido de nitratos al inicio del experimento fue de 15,8 mg/l lo cual disminuye de manera notoria a medida que pasa el tiempo (0 -19 días), llegando a 8,89 mg/l por efecto de los vegetales estudiados, logrando así un 46 % de remoción de nitratos, observándose una relación inversamente proporcional. Es decir, a mayor tiempo de permanencia de las plantas en aguas mieles, se reduce la concentración de nitratos.

Tabla 22. Prueba de media (Tukey 5%) para Nitratos en aguas en aguas mieles de *Coffea arabica* utilizando macrófitas respecto al tiempo de retención.

Tiempo de retención	N	Subconjunto			
		d	c	b	a
19 días	8	8,89			
14 días	8		11,21		
5 días	8			13,06	
Inicial	8				15,80

Los datos asentados en la figura 39, exhiben líneas de análisis entre el tiempo de retención y la cantidad promedio de nitratos expresados en mg/l, en función de los tratamientos estudiados. Argumentándose que (T2) *Eleocharis sp.*, a los 5, 14 y 19 días presenta una reducción de la concentración de nitratos (11,3 mg/l; 9.35 mg/l y 5,35 mg/l respectivamente). Reduciendo al final del experimento la cantidad de nitratos en un 66%.

El segundo lugar, en la remoción de nitratos corresponde a *Cyperus luzulae* con el 51% (7,7 mg/l). En tanto que, *Eichhornia crassipes* a los 19 días presenta una reducción del 36% (10,15 mg/l) y finalmente el testigo reduce la cantidad de nitratos en un 11 % (14,12 mg/l).

De acuerdo con los razonamientos desarrollados anteriormente, se evidencia que según los límites permisibles para nitratos (10 mg/l) para su descarga en cuerpos de agua dulce establecido en la legislación ambiental. Las aguas de los tratamientos con *Eleocharis*

sp., y *Cyperus luzulae* a los 19 días podrían ser vertidos directamente a su curso normal para su desecho o utilizado para riego.

Del análisis realizado a los nitratos, se infiere que los géneros *Eleocharis sp.* (5,35 ml/l) y *Cyperus luzulae* (7,7 mg/l) desarrollaron un sistema radicular más grande (5,88 cm) y numeroso (22,31 raicillas) respectivamente, alcanzando una mayor tasa de conversión de varios compuestos de nitrógeno y fósforo a sus formas de nitrato y fosfato, siendo el nitrógeno y el fósforo fundamentales para el crecimiento de productores primarios; sin embargo, cantidades elevadas de este elemento, generan la proliferación de varios microorganismos que reducen el OD del agua (Kunning et al. 2019), así se trate de concentraciones bajas, se constituye en amenaza para la estabilidad de los ecosistemas (Cárdenas y Sánchez, 2013).

Experimentos similares, según Charris y Osorio (2016) argumentan que el 90% de amonio ha sido removido, debido a las propiedades morfológicas que tiene la familia Cyperaceae como: *C. articulatus*, de rápido desarrollo, con tallos huecos, a través de los cuales transportan mayor cantidad de O₂ hacia el sistema radicular, favoreciendo ambientes aeróbicos que apoyan reacciones químicas de nitrificación en los humedales. En lo que respecta a las particularidades desarrolladas en el follaje y sistema radical, al igual que *Eleocharis sp.*, y *Cyperus luzulae* contribuyen a la eliminación de nitratos contenidos en aguas mieles.

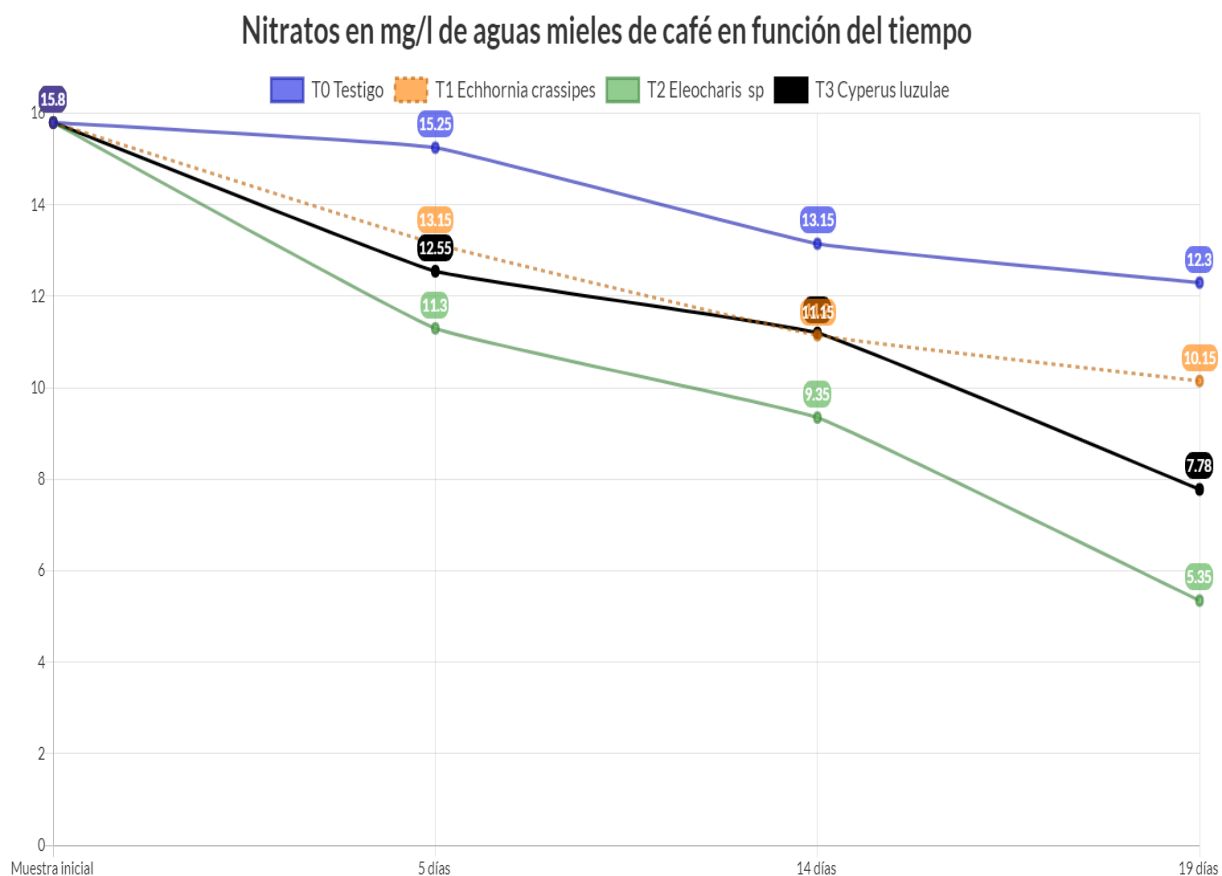


Figura 39. Nitratos en aguas mieles de *Coffea arabica* utilizando macrófitas con respecto al tiempo de retención

4.6. Presencia de nitritos en aguas mieles de café

Del análisis de varianza para el parámetro nitritos contenida en la Tabla 16, explica que el mayor promedio de nitritos pertenece a *Cyperus luzulae* (T₃) con 8,7 mg/l, pero no se diferencia del Testigo (T₀), y el menor promedio de Nitritos es de *Eleocharis sp.* (T₂) alcanzado 5,5 mg/l. En este mismo orden y dirección a los 14 días, el mayor promedio corresponde a *Cyperus luzulae* (T₃) con 7,8 mg/l y el menor promedio de nitritos presente en aguas mieles es para *Eleocharis sp.* T₂ (4,4 mg/l). En tanto que, el Testigo T₀ y *Eichhornia crassipes* T₁ no se diferencian entre sí. Ver tabla 17.

A los 19 días el mayor promedio corresponde del contenido de nitritos corresponde a *Eichhornia crassipes* (T₁) registrando un valor de 5,9 mg/l y el menor promedio *Eleocharis sp.* (T₂) con 3,25 mg/l. Mientras que el Testigo (T₀) y *Cyperus luzulae* (T₃) no se diferencian entre sí.

De lo mencionado anteriormente se establece que la variable presencia de nitritos tiene un comportamiento similar en función del tiempo de retención a las variables estudiadas anteriormente, a medida que pasa el tiempo la presencia de nitritos van disminuyendo, observándose los valores más bajos al final del experimento.

Con relación a la prueba de Tukey al 5% para nitritos, se deduce, a mayor tiempo de retención por parte de vegetales macrófitos en aguas mieles, se reduce la concentración de nitritos presentes en las misma. En consecuencia, se evidencia que el contenido de nitritos en la muestra inicial es de 8,45 mg/l disminuye a los 5, 14 y 19 días obteniéndose respectivamente una concentración de: 7,59 mg/l; 6,29 mg/l y 5,04 mg/l en promedio de nitritos entre tratamientos. De acuerdo con estos datos se desprende una disminución a los 19 días de los tratamientos en promedio de 40% de nitritos presentes en aguas mieles, como resultado de este análisis existe una relación directa entre el tiempo de permanencia de las plantas, y la eliminación de NO₂ (Ver tabla 23).

Tabla 23. Prueba de Tukey al 5% para nitritos en aguas mieles de *Coffea arabica* utilizando macrófitas respecto al tiempo de retención

Tiempo de retención	N	Sub conjunto o rangos			
		d	c	b	a
19 días	4	5,04			
14 días	4		6,29		
5 días	4			7,59	
Inicial	4				8,45

En la figura 40, se aprecia como la especie *Eleocharis sp.* tiene una disminución progresiva de nitritos a lo largo del ensayo, manteniéndose siempre por debajo del resto de tratamientos evaluados. Durante el tiempo evaluado el tratamiento T₁ *Cyperus luzulae* presenta los valores más altos de nitritos que el resto de tratamientos. La especie *Eichhornia crassipes* se comporta de manera similar, pero al final del experimento bajan e los valores de nitritos.

Similarmente, en la figura 40, se expone la relación entre el tiempo de retención y la cantidad promedio de nitritos expresados en mg/l, en función de las especies estudiadas precisándose que T₂ *Eleocharis sp.*, a los 5, 14 y 19 días presenta una reducción de la concentración de nitritos (5,47 mg/l, 4,35 mg/l y 3,25 mg/l respectivamente). Disminuyendo al final del experimento la cantidad de nitritos en un 62%.

El segundo lugar, en la remoción de nitritos corresponde al Testigo T₀ a los 19 días presenta una reducción del 36% (5,45 mg/l); el tercer lugar ocupa *Cyperus luzulae* (T₃) reduciendo la cantidad de nitritos en un 35 % (5,53 mg/l); mientras que *Eichhornia crassipes* disminuye 30% (5,93 mg/l) de nitritos en aguas mieles.

Del análisis efectuado según los límites permisibles definidos en (TULAS) para nitritos (10 mg/l) para su descarga en cuerpos receptores. Se establece que las aguas mieles sin previo tratamiento podrían verterse directamente a la fuente receptora.

En un estudio de “evaluación y monitoreo del uso de *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes* como medida de fitorremediación de aguas residuales”, luego de su análisis en laboratorio *Lemna minor* mostró eficacia en el decremento de nitritos y hierro con porcentajes de 99,91% y 91,03% respectivamente, mientras que, *Eichhornia crassipes* mostró menor eficiencia de remoción de nitratos con un porcentaje total de 97,88% (Quiñonez, 2018).

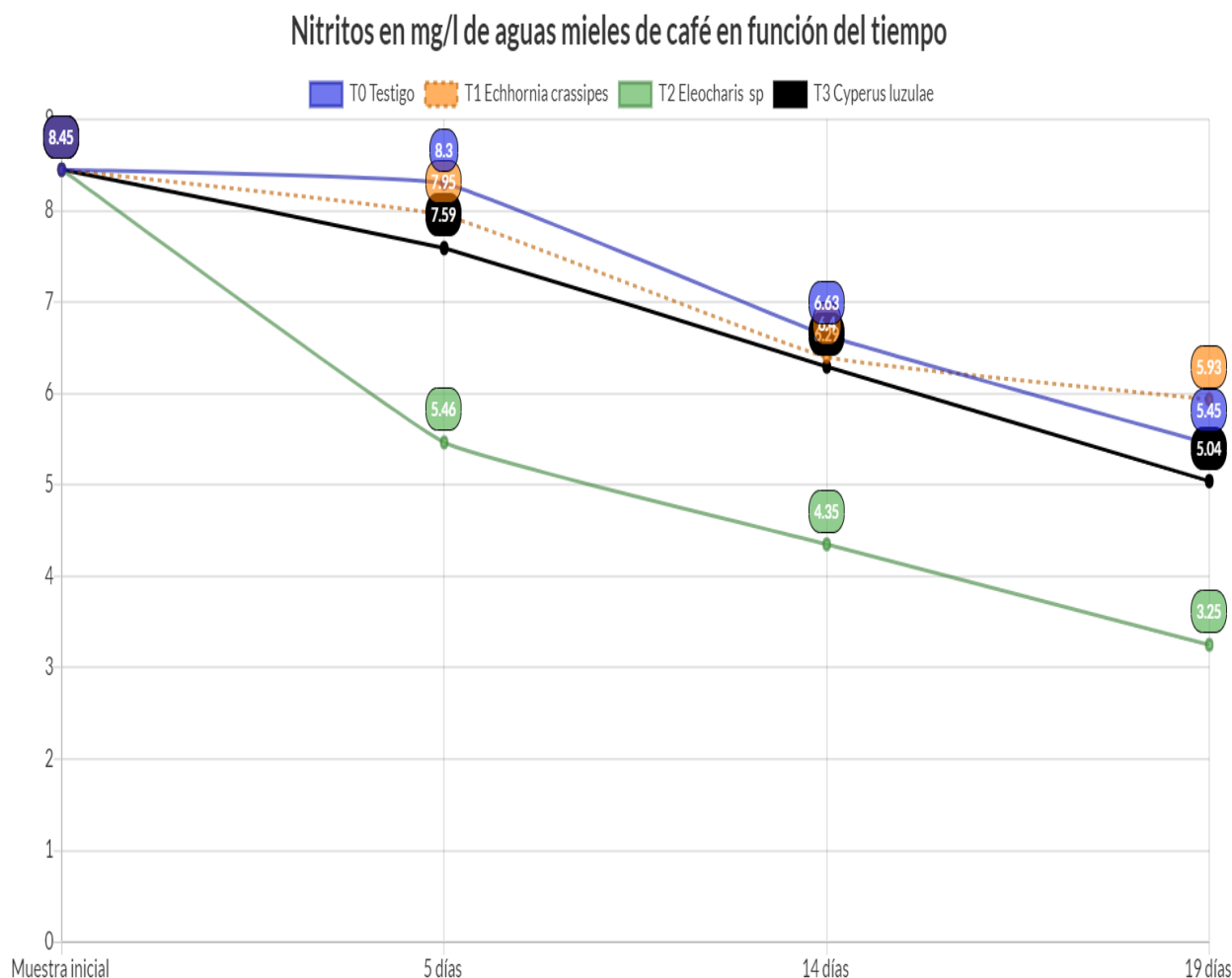


Figura 40. Nitritos en aguas mieles de *Coffea arabica* utilizando macrófitas con respecto al tiempo de retención.

4.7 Contenido de fósforo total

De los datos comprendidos en el ADEVA tabla 16, para fósforo total, empleando (MDS) se advierte a los cinco días, el mayor promedio lo tiene *Eichhornia crassipes* (T₁) con 13,2 mg/l, pero no se diferencia del Testigo (T₀) y el menor contenido corresponde a T₂ *Eleocharis sp.* (11,2 mg/l).

Similarmente según los datos de la tabla 17 a los 14 días para fósforo total, el mayor promedio corresponde al Testigo T₀ (11,2 mg/l) pero no se diferencia de *Cyperus luzulae* T₃ y el menor corresponde a *Eleocharis sp.* (T₂) conteniendo este elemento 9,0 mg/l. Al

terminar el experimento, a los 19 días, se señala el mayor tratamiento promedio compete al (T₀) Testigo (11,1 mg/l) y el menor promedio a *Eleocharis sp.* (T₂) con 5,6 mg/l. Ver tabla 18

De acuerdo a las ideas anteriores, en la tabla 24 se observa que variable presencia de fósforo total tiene un comportamiento similar en función del tiempo de retención a las variables estudiadas anteriormente, a medida que pasa el tiempo la presencia de fósforo total van disminuyendo, observándose los valores más bajos al final del experimento (19 días), a 8,71 mg/l. Se establece una relación inversamente proporcional, a mayor tiempo con las especies macrófitas merma el contenido de fósforo total.

Tabla 24. Tukey al 5%, para la variable fósforo total en aguas mieles de *Coffea arabica* utilizando macrófitas acuáticas.

Tiempo de retención	N	Sub conjunto o rangos			
		d	c	b	a
19 días	4	8,71			
14 días	4		10,49		
5 días	4			12,35	
Inicial	4				13,65

En la figura 41 se aprecia que, para esta variable fósforo total, el comportamiento de la especie *Eleocharis sp.* es similar que, en las variables estudiadas anteriormente con una disminución progresiva del fósforo total a lo largo del ensayo, manteniéndose siempre por debajo del resto de tratamientos evaluados. Al final del ensayo *Eleocharis sp.* (T₂) remueve la carga contaminante de fósforo total en un 59%; en tanto que, el tratamiento Testigo (T₀), presenta los valores más altos en el contenido fósforo total, removiendo únicamente el 19% de este contaminante; *Eichhornia crassipes* (T₁) merma la concentración de fósforo total en un 31%. La especie *Cyperus luzulae* logra disminuir la carga contaminante en un 35%. Según el anexo 1 libro IV de la legislación secundaria ambiental, indica que el término lícito para el vertido en cuerpos de agua dulce para fósforo total es 10mg/l de lo que se infiere que los tratamientos utilizando las plantas fitorremediadoras logran valores inferiores a este parámetro, es decir que a los 19 días ya pueden ser vertidas las aguas mieles e incluso el agua residual con el tratamiento de *Eleocharis sp.* a partir de 14 días. Excepto el tratamiento Testigo T₀ que supera dicho valor 11,05.

De lo anterior se deduce que las plantas macrófitas tienen la facultad de disminuir la carga contaminante de fósforo concordando con Quiñonez (2018) quien utilizó *Eichhornia crassipes*, obteniendo resultados favorables en la eliminación del 46,18 % fósforo en aguas residuales, el 40,39% atribuido a la especie *Lemna minor*, que son macrófitas flotantes, deduciéndose, por tanto que *Eleocharis sp.* logra una reducción superior correspondiente al 59 % de fósforo en las agua mieles, porcentaje superior de remoción a las estudiadas por Quiñonez, seguramente debido a que *Eleocharis sp.* al ser de la familia Cyperaceae logra una mayor adaptación a las aguas miles y debido a su morfología (tallo hueco y rizoma) alcanza una absorción inmediata de elementos (principalmente N y P) del medio, mismos que son integrados al conjunto de células vegetales, citado en Delgadillo, Camacho, Pérez, y Andrade (2010), por tanto *Eleocharis sp.* obtiene una remoción superior al experimento realizado por Soto, García, de Luis y Becares (1999) quienes afirman que al emplear *Scirpus lacustris* (totora) planta de la misma familia que *Eleocharis sp.* en un humedal subsuperficial logra remover el 10% de fósforo total .

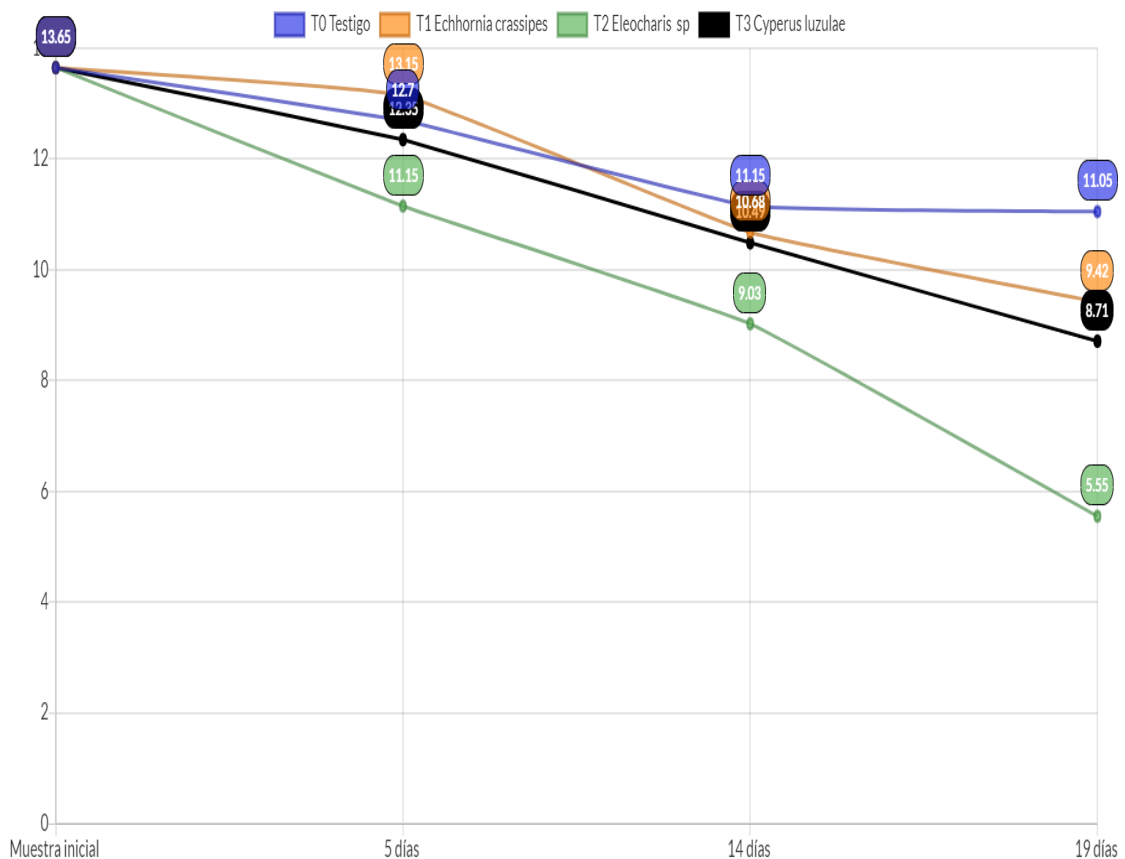


Figura 41. Fósforo total, en aguas mieles de *Coffea arabica* utilizando macrófitas con respecto al tiempo de retención

4.8 Turbidez

Para **turbidez**, según (MDS) expuesta en la tabla 16 destaca que los cuatro tratamientos están visiblemente discriminados o separados (letras diferentes), A los cinco días, hay clara separación de las medias de tratamiento, siendo el mayor para (T₁) *Eichhornia crassipes*, con 231,0 NTU (unidad de turbidez nefelométrica); y el menor para *Eleocharis sp.* T₂ (150,0 NTU). Similarmente al análisis anterior, se mantiene la tendencia a los 14 días, según el ADEVA de la tabla 17, existe diferenciación de las medias de tratamiento, presentando la mayor concentración de turbidez *Eichhornia crassipes* (T₁) con (179,5 NTU) y el menor contenido en *Eleocharis sp.* (T₂) con 89,5 NTU.

Al final del experimento (tabla 18), se observa que el mayor promedio corresponde a T₁ *Eichhornia crassipes* (134,0 NTU), pero no se diferencia estadísticamente del Testigo T₀ (121,0 NTU) y el menor corresponde a *Eleocharis sp.* (T₂) con 42,5 NTU. En todos los casos analizados existe una disminución de la turbidez comparada con la muestra inicial de aguas mieles que contenían 252,5 NTU, por efecto del medio filtrante (grava y arena), así como las plantas, retienen las partículas en suspensión de aguas mieles de café, fenómeno atribuido a la absorción y acumulación por parte de las raíces, proceso conocido como rizo filtración, coincidiendo con Delgadillo et al. (2011) quienes señalan que este hecho está relacionado con la capacidad que tienen ciertas especies para la remoción, reducción, transformación, mineralización, degradación, volatilización o estabilización de contaminantes, atribuido a fuerzas electrostáticas.

Las cifras presentadas en la tabla 25, advierten el (ADEVA) para turbidez en cada uno de los tratamientos evaluados, se observa un comportamiento similar en función del tiempo de retención a las variables estudiadas anteriormente, a medida que pasa el tiempo la turbidez va disminuyendo, observándose los valores más bajos al final del experimento (19 días).

Tabla 25. Prueba Tukey al 5%, turbidez en aguas mieles de *Coffea arabica* utilizando macrófitas acuáticas.

Tiempo de retención	N	Subconjunto			
		d	c	b	a
19 días	4	97,50			
14 días	4		136,00		
5 días	4			190,37	
Inicial	4				252,50

En la figura 42 se aprecia que para esta variable el comportamiento de la especie *Eleocharis sp.* tiene un comportamiento similar a las variables estudiadas anteriormente con una disminución progresiva de turbidez a lo largo del ensayo, manteniéndose siempre por debajo del resto de tratamientos evaluados. Durante todo el ensayo *Eichhornia crassipes* (T_1) presenta mayores valores de turbidez en los periodos de tiempo estudiados, por debajo de ella se encuentra los demás tratamientos. Concluyéndose que al final del experimento el tratamiento con *Eichhornia crassipes*, presenta una retención del 47%, es decir que las aguas mieles en este tratamiento contienen mayor cantidad de sólidos disueltos, comparada con el Testigo T_0 solo con sustrato que retiene el 57% de sólidos disueltos; *Cyperus luzulae* (T_3) logra disminuir la turbidez en un 63% y el mejor tratamiento lo constituye *Eleocharis sp.* alcanzando la mayor absorción de sólidos suspendidos en aguas mieles representando el 83%. Valores de remoción de turbidez inferiores a los resultados alcanzados para *Nymphoides humboldtiana*, *Eichhornia crassipes* y *Nasturtium officinale* con 92,00%, 90,33% y 89,00%, respectivamente estudiado por (Ayala et al. 2018).

Es preciso indicar que *Eichhornia crassipes* presenta un mayor grado de turbidez debido a que este tratamiento no contó con el sustrato (grava y arena) que según (Arias et al. 2010), “permite una mejor inmovilización y sedimentación de ST, en virtud a la cantidad de poros y tamaño de sustratos utilizados como filtros.

De todo lo anterior, se comprueba que los tratamientos evaluados muestran disminución de la turbidez y comparándolos con los parámetros según normas para consumo humano y doméstico permitidos de turbidez (100 NTU), cumplen con la normativa únicamente *Eleocharis sp.*(T_2) y *Cyperus luzulae* (T_3) por el efecto de fitorremediación pues respectivamente alcanzan al final del experimento valores 42,5 NTU y 92,5 NTU

observándose cambios evidentes en la gama de color de aguas mieles percibiéndose una mejora en su calidad Granados (2018) en su estudio de factibilidad para implementar humedales artificiales, indica que el empleo de macrófitas pertenecientes a los géneros: *Cyperus* y *Lilium* en humedales artificiales misceláneos, logran una disminución de la turbidez del 68% a la salida del sistema, dato ligeramente superior al resultado obtenido con *Cyperus luzulae* 63% y muy inferior al obtenido por *Eleocharis sp.* 83%.

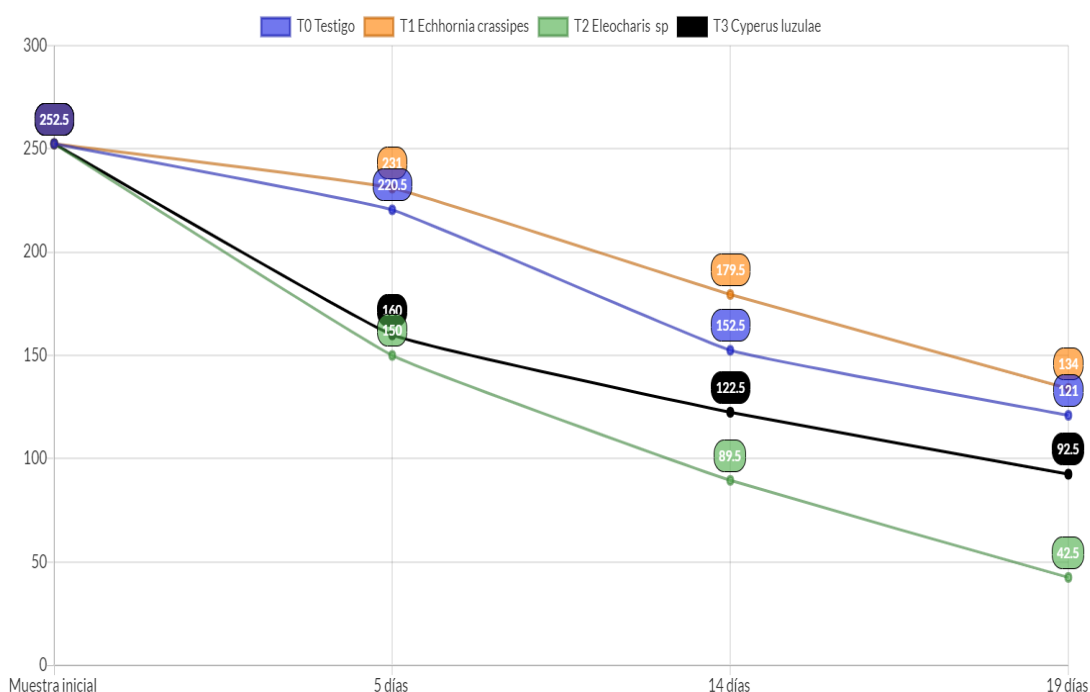


Figura 42. Turbidez en NTU en aguas mieles de *Coffea arabica* utilizando macrófitas con respecto al tiempo de retención

4.9 Análisis de pH en aguas mieles

En la tabla 26 se muestra información referida a pH contenidos en aguas mieles de *Coffea arabica*, de su análisis de varianza se observa que hay evidencias estadísticas de que ocurre diferencias entre tratamientos estudiados. Es indudable entonces que las distintas especies macrófitas utilizadas intervienen en el pH teniendo un comportamiento diferenciado, porque el nivel de significación es inferior a 0,05.

Tabla 26. ADEVA para pH de aguas mieles (*Coffea arabica*) con macrófitas acuáticas.

Origen	Tipo III. suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	50,32	39	1,29	28,51	0,000
Tratamiento	21,98	3	7,32	161,89	0,000
Fecha	25,23	9	2,80	61,98	0,000
Tratamiento * Fecha	3,28	27	0,12	2,69	0,000
Error	3,52	78	0,04		
Total	53,85	117			

Se observa que el procedimiento es similar para (T₀) el testigo y (T₃) *Cyperus luzulae* comparten el mismo rango (b); mientras que el Jacinto de agua (T₁) *Eichhornia crassipes* tienen un comportamiento separado a igual que *Eleocharis sp.* (T₂). Evidenciándose en este último el valor promedio más alto. Ver tabla 27

Tabla 27. Prueba de Tuckey al 5%, para pH en aguas mieles de *Coffea arabica* utilizando macrófitas acuáticas.

Vegetales	N	Subconjunto		
		c	b	a
T ₁ . <i>Eichhornia crassipes</i> .	30	3,34		
T ₃ <i>Cyperus luzulae</i>	30		4,223	
T ₀ Testigo	30		4,272	
T ₂ <i>Eleocharis sp.</i>	28			4,44

Al analizar las cifras expuestas en la tabla siguiente, se infiere que en función del tiempo el potencial hidrógeno, éste va incrementándose, es decir; existe una relación directa a mayor tiempo, mayor pH, notándose la existencia de seis rangos, presentado un incremento significativo del pH el 15 y 18 de octubre, advirtiéndose dos rangos a y b que compartan esta tendencia.

Tabla 28. Prueba de Tukey al 5% para el valor de pH de aguas mieles a través del tiempo

Toma de muestras	N	Subconjunto					
		f	e	d	c	b	a
29/10/2020	12	2,87					
30 /10/2020	12		3,82				
02 /10/2020	12		4,012	4,20			
04 /10/2020	12		4,05	4,05	4,05		
05 /10/2020	12			4,12	4,12		
08 /10/2020	11			4,15	4,15	4,15	
11 /10/2020	11			4,22	4,22	4,22	
13 /10/2020	12				4,32	4,32	
15 /10/2020	12					4,43	4,43
18 /10/2020	12						4,66

La figura 43 exhibe, la transformación que muestra el pH de aguas mieles del café por especie vegetal a través del tiempo, estableciéndose al final del experimento que *Eleocharis sp.* (T₂), incrementa su nivel de pH a 5,02 es decir, que por efecto del sistema de humedal y la especie *Eleocharis*, paso de moderadamente ácido (2,87 valor del pH del afluente inicial) a ligeramente ácido (5,02) y al relacionarlo con el valor de descarga permitido para agua dulce (5 a 9 mg/l) cumple con este parámetro, por el contrario, los demás tratamientos a los 19 días tienen un valor inferior, es decir se encuentran en la escala de pH descrita como moderadamente ácido que pueden causar efectos negativos en los sitios de descarga. Análisis que concuerda con Chen, Kao, Jou, Fu y Chang (2008) quienes afirman “que las plantas acuáticas generan una actividad biológica favorable (adsorción, absorción, acumulación, entre otras), es decir, mayor eficiencia en la descomposición y biodegradación de materia orgánica, lo cual origina una tendencia a la regulación del pH” (pág. 413), de manera similar Ayala et al. (2018) manifiestan que la extracción de parámetros químicos demuestra que *Eichhornia crassipes* alcanza un pH casi neutro a los 60 días en una investigación sobre fitorremediación de aguas residuales domésticas llevada a cabo en Chachapoyas, Perú.

Se precisa, que el comportamiento del pH para *Eichhornia crassipes* (T₁) los 19 días presentó el menor pH incluso inferior al testigo, atribuido al proceso de fermentación de aguas mieles por la cantidad de sólidos totales contenida en éstas, además este tratamiento no contó con sustrato (arena y grava) solo aguas mieles, análisis que coincide con Córdoba y Guerreo (2016) quienes analizaron diferencias del proceso de fermentación

en aguas mieles de café, atribuido “ a enzimas naturales, a levaduras y bacterias presentes en el mucílago” produciendo varios fenómenos químicos; oxidación incompleta de azúcares, originando Adenosín Trifosfato, alcohol y ácidos, ocasionado cambios en el potencial Hidrógeno, en la coloración, fragancia y estructura química, modificaciones relacionados directamente con el periodo de permanencia de la fase de fermentación.

pH en aguas mieles de café en función del tiempo de exposición con macrófitas

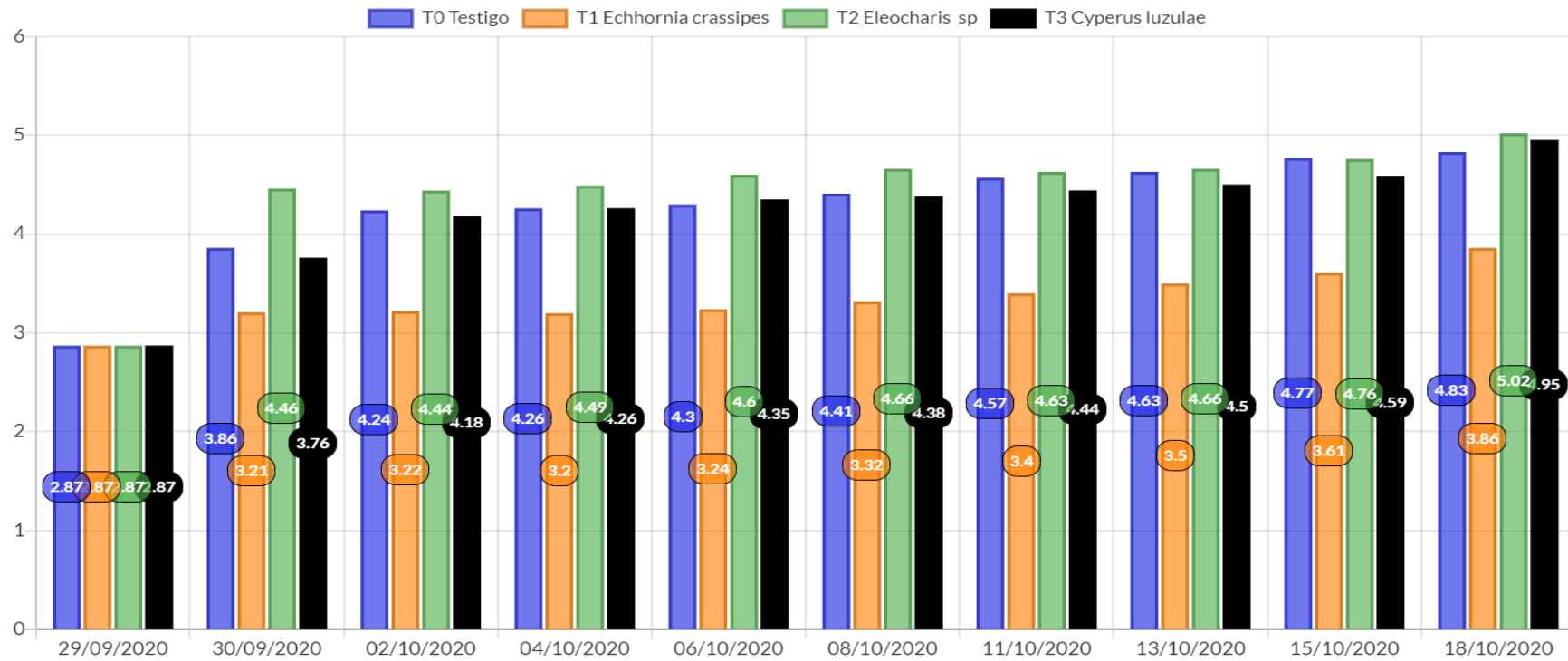


Figura 43. pH en aguas mieles de *Coffea arabica* utilizando macrófitas con respecto al tiempo de retención

4.10 Resultados de adaptación basado en características morfológicas de las macrófitas en estudio

El análisis que se presenta con relación al número de raíces y longitud de raíces de las plantas macrófitas, permiten analizar cualitativamente estas dos variables, como formas de adaptación de las especies estudiadas

4.10.1 Número de raíces

En la tabla 29 se aprecia, el (ADEVA) para número y longitud de raíces contenidas en aguas mieles del café, en cada uno de los tratamientos evaluados, se infiere que no existe diferencias estadísticas significativas entre tratamientos evaluados. Por tanto, no se usó la prueba de Tukey.

Tabla 29. ADEVA para la variable número de raíces en aguas mieles de *Coffea arabica* utilizando macrófitas acuáticas.

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	261,48	4	65,38	2,30	0,21
Tratamientos	154,43	2	77,21	2,72	0,18
Subsistemas	107,07	2	53,53	1,89	0,27
Error	113,48	4	28,37		
Total	374,98	8			

Se observa para el número de raíces de las especies macrófitas evaluadas, no presentan diferencias relevantes entre tratamientos; sin embargo, la especie *Eleocharis sp.* está por encima de las otras dos con un valor de 22,31 raíces, en cambio las *Cyperus luzulae* y *Eichhornia crassipes* presentan valores similares con 14,00 y 13,11 raíces respectivamente.

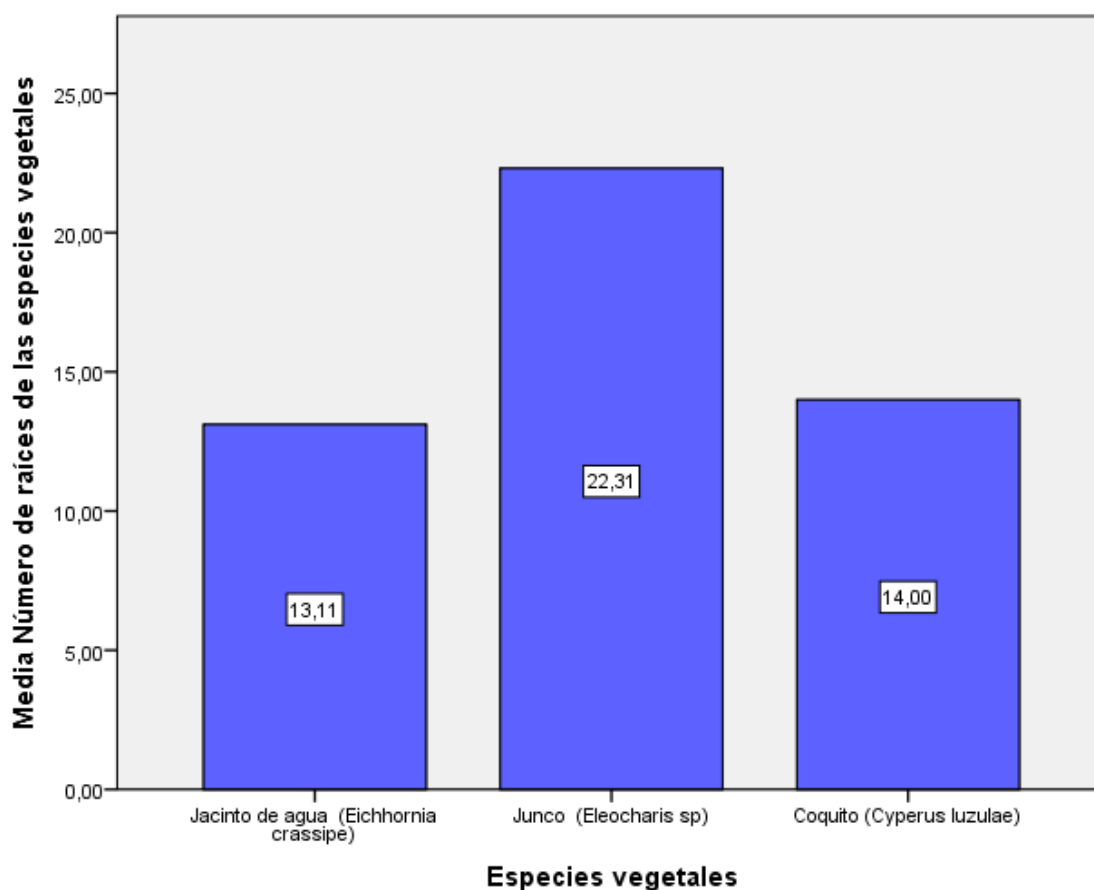


Figura 44. Número de raíces de las especies macrófitas acuáticas evaluadas en aguas mieles de *Coffea arabica*.

4.10.2 Longitud de raíces

En la tabla 30 se expone el ADEVA, para Longitud de raíces, desarrolladas en aguas mieles de café en cada tratamiento evaluado, determinándose la no existencia de disimilitudes entre tratamientos evaluados.

Tabla 30. Análisis de la varianza (ADEVA) longitud de raíces en cm en aguas mieles de *Coffea arabica* utilizando macrófitas acuáticas.

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	25,58	4	6,39	3,42	0,13
Tratamientos	19,44	2	9,72	5,21	0,08
Subsistemas	6,13	2	3,07	1,64	0,30
Error	7,47	4	1,87		
Total corregido	33,04	8			

En la figura 45, se expone la longitud de raíces de las especies macrófitas acuáticas evaluadas, se observa que para esta variable no hay distinción entre plantas estudiadas. La especie *Eleocharis sp.*, alcanzó un promedio en longitud de raíces de 5,88 cm, siendo casi similar a *Cyperus luzulae* que obtuvo un promedio de 5,83 cm y *Eichhornia crassipes* presentan valores menores con 2,24 cm de longitud de raíz respectivamente. Así también, con relación al número de raíces *Eleocharis sp.* obtuvo al final del experimento el mayor número de raíces 22,33; mientras que *Cyperus luzulae* contó con 14 y *Eichhornia crassipes* con 13,11. Es importante señalar que las raíces o raicillas que se midieron son nuevas, característica morfológica que indica la adaptación de estas especies a aguas mieles derivadas del lavado del café.

Análogamente. el estudio de tallos nuevos o brotes, señalan que (T₂) *Eleocharis sp.* alcanza el mayor tamaño promedio 15,62 cm comparándola con *Cyperus luzulae* que obtuvo un promedio de 8 cm, por ser de la misma familia *Cyperaceae*. Se precisa que para *Eichhornia crassipes* se midió el pedicelo de la hoja alcanzando un promedio de 1,5 cm; pero no son comparables con las otras especies por tratarse de familia diferentes (*Pontederiaceae*).

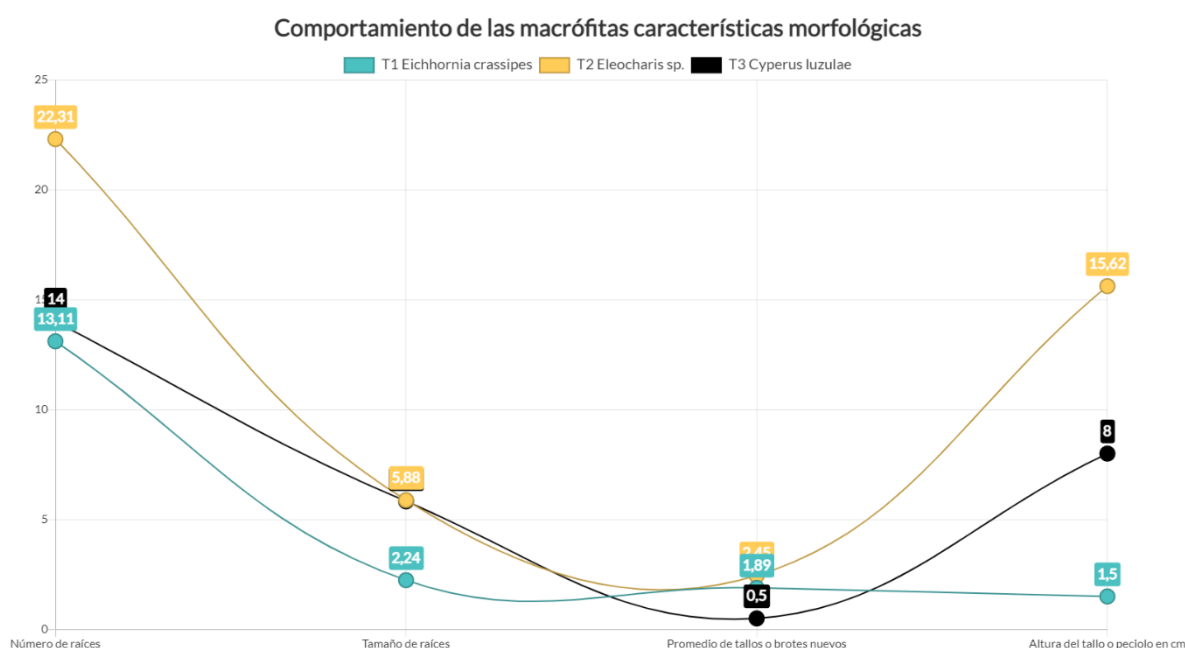


Figura 45. Datos de características morfológicas de especies utilizando macrófitas acuáticas evaluadas en aguas mieles de *Coffea arabica* obtenidos al final del experimento

Del análisis estadístico se infiere que la familia Cyperaceae logra una mayor adaptación en aguas mieles de café especialmente *Eleocharis sp.* porque incluso presenta nuevas tallos o brotes de raíces de mayor tamaño 15,62 cm que *Cyperus Luzulae* (8 cm) con una adaptación media confirmando el estudio realizado por Celis, Junod y Sandoval (2005) quienes sugieren el empleo de especies macrófitas enraizantes en la purificación de aguas residuales por las características de desarrollo porque crecen enraizadas en el suelo, en aguas superficiales, así las hojas u los tallos y hojas brotan del agua, alcanzando alturas entre los 2-3 m. Las plantas usadas para remoción de contaminantes pertenecen a la familia Ciperáceas como el junco, el coquito, la totora entre otras.



Figura 46. izq.) *Eleocharis sp.* al inicio. der.) *Eleocharis sp.* al final del experimento



Figura 47. Izq.) *Cyperus luzulae* al inicio. Der) *Cyperus luzulae*. al final del experimento

En tanto que, la familia Pontederiaceae a la que pertenece *Eichhornia crassipes* denominada vulgarmente como “Jacinto de agua”, es una especie flotadora siendo ésta, mayormente estudiada, por sus características depuradoras y por su fácil propagación, esencialmente en zonas tropicales y subtropicales. (Celis et al. 2005). Sin embargo, en este estudio es la especie que presentó el menor porcentaje de remoción en los parámetros físico químico estudiados. Posiblemente porque fue introducida desde otro ecosistema (Cuenca), presentado un amarillamiento general de la planta, por tanto, se define que esta

planta empezó a adaptarse a partir de los 14 días y al final del experimento cuenta con un promedio de 13 raicillas nuevas con un tamaño promedio de 1,5.

Diferentes investigaciones demuestran la utilidad de *Eichhornia crassipes* para la extracción de contaminantes y en la depuración de aguas residuales, especialmente de níquel (Bres, Crespo, Rizzo, y La Rossa, 2012), y que en esta investigación también logró niveles de remoción más bajos en los parámetros físico químicos analizados con relación a *Eleocharis sp* y *Cyperus luzulae*.



Figura 48. Izq.) *Eichhornia crassipes* inicio. Dch) *Eichhornia crassipes*. fin del experimento

Del análisis anterior se concuerda con Delgadillo et al. (2011) que las macrófitas emergentes o enraizadas se usan en la fitorremediación de aguas agroindustriales por la capacidad que estas plantas poseen para absorber, estabilizar, volatilizar o transformar diferentes sustancias tóxicas presentes en la masa de agua. Y por estas características Gutiérrez y Romero (2019) han seleccionado a *Eleocharis sp.* y *Eichhornia crassipes* entre otras, en un estudio en la ciudad de Neiva Colombia. Así también Celis et al. (2005) posicionan a *Eleocharis sp.* como una planta enraizada que inmoviliza los contaminantes por medio de un proceso de Fito estabilización, fijándolos en la rizosfera, utilizando el sistema radicular; estudios con especies del género *Eleocharis sp.* han demostrado la capacidad para retener incluso material radioactivo. por tanto, en esta investigación el género *Eleocharis* consigue la más alta tasa de sustracción de parámetros físico químicos contenidos en aguas mieles.

En este orden de ideas, se puede decir que por la morfología del incremento de raíces y crecimiento de las Ciperáceas como *Eleocharis sp.* estén favoreciendo su mayor rendimiento comparativamente con *Cyperus luzulae* y sobre todo en relación a *Eichhornia crassipes*, en la remoción de contaminantes como lo sugiere Charris y Osorio (2016) en correspondencia a lo estudiado por algunos autores quienes precisan la existencia de

diferencias en función con la especie vegetal empleado en los experimentos (Brisson y Chazarenc, 2009) y (Leto, et al. 2013).

En conformidad con lo manifestado por Vymazal (2013), las plantas generalmente utilizadas mundialmente son: carrizo y junco. En este mismo sentido, Brisson y Chazarenc (2009) ratifican que la elección de especies macrófitas en los humedales artificiales, no pueden universalizarse, pues dependen de factores ambientales en los que se lleven a cabo, la remediación.

Finalmente, diversos autores ratifican los resultados favorables obtenidos con el uso de sistemas con la utilización de plantas, contrariamente a tratamientos carentes de plantas, por el efecto las plantas en estos sistemas atribuyéndoles la remoción de contaminantes, por la acción de diferentes procesos físicos y bioquímicos como sedimentación, degradación microbiana, absorción, en humedales. En este mismo sentido Stearman, George, Carlson y Lansford, 2003 y Delgadillo et al. 2010), posicionan el descenso de más del 20% de sustancias contaminantes en humedales que contienen plantas contrariamente a los no plantados.

4.11 Discusión adicional de resultados

A nivel mundial los humedales naturales son definidos como ecosistemas muy productivos con una biodiversidad muy rica, ellos pueden proveer muchos beneficios al ambiente, además de ser muy agradables a nivel de paisajes (Sun, Zhen y Miah, 2017). Otro aporte los humedales construidos son sistemas diseñados por ingenieros para el tratamiento de aguas residuales, simulando los procesos que ocurren de manera natural en el ambiente, pero de forma controlada (Wu, Kuschik, Brix, Vymazal y Dong, 2014).

El tratamiento de aguas residuales procedentes de diferentes industrias puede ser llevada a cabo mediante el uso de humedales como alternativa para la depuración de dichos efluentes, consiguiendo una eliminación de materia orgánica, nutrientes y metales pesados. También es importante mencionar que el uso de humedales ofrece ventajas a la sociedad, que se traduce en una mejora de la calidad de vida de la población, disminuyendo el impacto negativo al ambiente (Schrauf y Smith, 2005).

Para Sotomayor (2009) mencionado en Redolfo y Sandi (2015), indica que la construcción de este tipo de procesos de depuración es ventajosa desde el punto de vista

económico, por su bajo costo de inversión en las fases de: construcción, mantenimiento y consumo de energía en comparación con otros tipos de tratamiento de aguas residuales como el proceso de lodos activados que requiere una alta inversión tanto en equipos como en el mantenimiento.

El camino relevante a seguir durante la aplicación de los humedales para el tratamiento de aguas de aguas mieles es la remoción biológica de contaminantes, o lograr la mayor biodegradabilidad de las aguas a tratar; en este sentido se logró la remoción de contaminantes a través de las plantas macrófitas, que tomaron los nutrientes esenciales para llevar a cabo sus necesidades metabólicas tales como la materia orgánica, nitrato, fósforo, e incluso estudios realizados por Sun et al. (2017). demuestran que también las plantas pueden extraer metales tóxicos como cadmio y plomo.

La biodegradación de los contaminantes presentes en las aguas residuales en los humedales es llevada a cabo fundamentalmente por la acción de las poblaciones adheridas, el medio de soporte y la superficie de la planta, debido a que estos tres elementos brindan un soporte importante en el crecimiento de microorganismos y la velocidad de degradación de los contaminantes presentes. Las plantas a utilizar pueden variar en cuanto a la velocidad de remoción de contaminantes y va a depender de la concentración del contaminante que se desea eliminar, velocidad de crecimiento de la planta entre otros, también resulta importante que los microorganismos y las bacterias presentes en el suelo capten y almacenen nutrientes a corto plazo.

Resulta fundamental indicar que, en los humedales artificiales o contruidos, la capacidad de remoción de los contaminantes, se debe a efectos combinados de la acción filtrante, el tiempo de retención hidráulica y la actividad biológica que exista en el sistema. Generalmente cuando se reporta disminución en los valores de la concentración de la DQO a lo largo de los análisis, se debe al metabolismo de los microorganismos heterótrofos tanto aerobios como anaerobios, que utilizan los compuestos orgánicos del efluente con la finalidad de producir biomasa, y a su vez en el sistema se llevan a cabo reacciones químicas principalmente de óxido reducción (Rodríguez y Durán, 2006).

Parámetros como la difusión y convección de oxígeno se ven afectadas por la carga de la DQO de las aguas residuales a tratar, el diseño del humedal artificial, el tipo de sustrato, y las condiciones de operación. Existe otros parámetros importantes que pueden afectar la remoción de la DQO y es el aporte de oxígeno por las raíces de las plantas hacia la rizosfera, mientras que la absorción de la materia orgánica por parte de la planta resulta

ser insignificante en comparación con la degradación biológica (Romero, Colín, Sánchez y Ortiz, 2009).

El tiempo de retención hidráulica es definido como el lapso de tiempo que van a permanecer en contacto los contaminantes con las plantas y los microorganismos con la finalidad de lograr la biodegradación, transformación biológica y química por parte de los microorganismos. Para establecer tiempos de retención hidráulica en humedales es necesario llevar a cabo pruebas e ir analizando parámetros de remoción como la DQO o DBO con la finalidad de establecer el tiempo de contacto necesario entre el agua residuales y el humedal. En cuanto a la remoción de DQO, nitrógeno y fósforo de las aguas residuales el tiempo de retención hidráulica óptimo o adecuado va a depender del tipo de planta utilizado, así como del volumen de agua tratado (Romero et al. 2009).

En la presente investigación se determinó que en los cuatro tratamientos probados la los parámetros físico químicos a excepción del pH disminuyeron a medida que aumentó el tiempo de contacto entre las aguas de mieles y el humedal, estableciendo un tiempo de retención de 19 días corroborando la relación existente entre el tiempo de retención hidráulica y la acción filtrante del sustrato reteniendo la mayor cantidad de solidos de las aguas mieles y el correcto mantenimiento de la cinética microbiana del sistema analizado por (Romero, et al., 2009).

La descomposición de la materia orgánica y nutrientes presentes en las aguas mieles constituye un proceso clave dentro de los sistemas de humedales artificiales; aunque la descomposición es considerada un proceso ecosistémico, resulta ser muy complejo debido a que se manifiesta a nivel de comunidades biológicas presentes en el sistema que son muy diversas, por lo que en la actualidad no existen estudios específicos acerca del comportamiento de la cinética microbiana en los humedales artificiales. (Sun, et al. 2017).

La comunidad bacteriana que actúa en los humedales artificiales aún se encuentra en estudio, pero generalmente se basa en microorganismos heterótrofos que van a llevar a cabo el papel de biodegradación de los componentes presentes en las aguas a tratar. Es importante mencionar que es muy común que en el sistema de los humedales artificiales tiendan a establecerse bacterias en las raíces de las plantas las cuales van a favorecer el proceso de remoción de toda la materia orgánica y nutrientes presentes en las aguas residuales. El establecimiento de un grupo activo de microorganismos que represente adecuadamente la cinética de degradación en estos sistemas de depuración es fundamental para remover de forma eficiente la mayoría de los compuestos presentes en

las aguas residuales. Compuestos más complejos como son el nitrógeno y el fósforo son transformados a compuestos más simples y fáciles de eliminar del sistema (Redolfo y Sandi, 2015).

Los microorganismos son la parte principal del funcionamiento de los humedales artificiales, ya que de estos depende la eficiencia en la remoción de los contaminantes. Los compuestos orgánicos, nitrogenados y fosforados son transformados a formas más simples y, por lo tanto, más fáciles de eliminar del sistema (Arias, et al. 2010).

Al llevar a cabo la construcción de un humedal artificial es necesario analizar y considerar el efecto del sustrato sobre el proceso de biodegradación de la materia orgánica y nutrientes, las condiciones más favorables para cada subsistema que conforma el humedal, la cinética de la biomasa establecida en el sistema con las especies de plantas utilizadas, el control del humedal y el tiempo de retención hidráulico del sistema; siendo indispensable conocer los procesos de nitrificación, desnitrificación y la biodiversidad de los microorganismos. (Arias, et al 2010).

Finalmente, diversos autores ratifican los resultados favorables obtenidos con el uso de humedales artificiales con la utilización de plantas, contrariamente a tratamientos carentes de ellas: por el efecto de remoción de sustancias atribuido a las macrofitas en estos sistemas, por la acción de diferentes procesos físicos y bioquímicos como sedimentación, degradación microbiana y absorción. En este mismo sentido (Stearman, George, Carlson y Lansford, 2003; Delgadillo et al. 2010), posicionan el descenso de más del 20% de sustancias contaminantes en humedales que contienen plantas no obstante a los no plantados.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación comprueban la hipótesis formulada, por tanto, se confirma la existencia de diferencias significativas relacionadas con la remoción de características físico químicas contenidas en aguas mieles derivadas del beneficio húmedo entre los tratamientos estudiados. Determinándose en los tratamientos probados que los parámetros disminuyeron en medida que se incrementó el tiempo de contacto entre las aguas de mieles y el humedal excepto el pH, debido a la relación existente entre el tiempo de retención hidráulica, la acción filtrante del sustrato y el efecto de rizo filtración de las plantas macrofitas como parte del proceso de biodegradabilidad.

Se determinó que el SHFSSH con sustrato (arena y gravilla) y el empleo de plantas macrofitas emergentes o enraizadas pertenecientes a la familia Cyperaceae: *Eleocharis sp.*, y *Cyperus luzulae* utilizadas en este experimento tuvieron mayor eficiencia en la remoción, siendo *Eleocharis sp.* la que obtuvo el mayor porcentaje de remoción de contaminantes en las variables físicas químicas estudiados, debido a su adaptación (número de raíces, tamaño de raíces, desarrollo de tallos y hojas) en aguas mieles de café por ser nativa de la Amazonia. En tanto que *Eichhornia crassipes* presento porcentaje de remoción más bajos, por tratarse de una planta introducida al ecosistema selva y además no contó con un medio filtrante.

Al final del experimento *Eleocharis sp.* logró remover el 66%, *Cyperus luzulae* disminuye la concentración en un 26%, *Eichhornia crassipes* el 22% y Testigo con el 18% del DQO, concluyéndose entonces que las plantas macrófitas inciden favorablemente en disminuir la DQO en función al tiempo de retención, sin embargo, todos los tratamientos superan el límite máximo permisible (250 ml/l) de la normativa ecuatoriana.

Con relación al DBO₅, *Eleocharis sp.*, reduce el 63%, *Cyperus luzulae* el 20%, *Eichhornia crassipes* el 16% y el testigo 12%, de cuyo análisis ningún tratamiento cumple con la normativa ambiental vigente para su vertido en cuerpos de agua dulce, debido a que la eficacia en la eliminación de este parámetro, está relacionado en función del tiempo de remoción y la influencia de factores ambientales como la precipitación, pues el experimento se desarrolló en condiciones controladas.

Eleocharis sp., remueve el 71%, *Cyperus luzulae* 46%, *Eichhornia crassipes* 35% y el Testigo el 19% de sólidos totales (ST), contenido en aguas mieles, porque intervienen la actividad de macrófitas y microorganismos que viven en las raíces, mediante el proceso denominado rizo filtración. Por otra parte, el Testigo tiene una disminución menor de ST por efecto del medio filtrante, deduciéndose el efecto superior en la remoción del ST por parte de las macrófitas estudiadas. Todos los tratamientos cumplen con el límite permisible.

Los nitratos contenidos en el afluente registraron 15,8 mg/l, a los 19 del experimento se observa una diferencia significativa para *Eleocharis sp.* que logra una remoción del 66 % (5,35 mg/l) y *Cyperus luzulae* de 51% (7,7 mg/l) %, debido a que desarrollan un sistema radicular de mayor tamaño y numeroso, y por ende estos dos tratamientos cumplen con la normativa de descarga por ser inferiores al límite permisible (10 mg/l). debido a las cualidades morfológicas específicas de las Cyperaceae: como rápido crecimiento y presencia de tallos huecos, factores que posiblemente han transferido más oxígeno hacia la zona de raíces, para promover condiciones aeróbicas que favorecieron los procesos de nitrificación en el sistema.

Se establecen diferencias significativas, indicando la mayor eficiencia para *Eleocharis sp.*, en la eliminación de nitritos en un 62 %, concluyéndose que las aguas mieles de café, podrían ser vertidas directamente a la fuente receptora sin tratamiento alguno y está en relación directa con el tiempo de remoción.

Con relación a la remoción de fósforo, se precisa diferencias estadísticas significativas así: *Eleocharis sp.* logra el 59%, seguido de *Cyperus luzulae* 35% y *Eichhornia crassipes* 31% de eliminación de este elemento al final del experimento, por tanto, el efluente de estos tratamientos puede ser vertidos ya en cuerpo receptor porque cumplen con la normativa vigente (10mg/l) e inclusive el agua miel proveniente del tratamiento con *Eleocharis sp.* puede ser ya diseminado a partir de 14 días, deduciendo que esta especie muestra mayor eficiencia en la remoción del fósforo.

El resultado para turbidez al final del experimento, muestra a *Eleocharis sp.*, como la macrófita más eficiente logrando una disminución del 83%; seguida de *Cyperus luzulae* con el 63%, debido a la retención de las partículas en suspensión contenidas en aguas mieles, por parte de las raíces y por consecuencia del medio filtrante (grava y arena), demostrándose la eficiencia del SHSS y cumplen con los límites permitidos (100 NTU).

Al final del experimento se determina que *Eleocharis sp.* (T₂), incrementa su nivel de pH a 5,02 es decir, el agua miel del café por efecto del humedal artificial y de la especie *Eleocharis*, paso de moderadamente ácido (2,87) a ligeramente ácido (5,02) y al relacionarlo con la normativa vigente para el vertido en un cuerpo receptor (5 a 9 mg/l) cumple con este parámetro, por el contrario, los demás tratamientos a los 19 días tienen un valor inferior, pudiendo causar efectos negativos en sitios de descarga.

Se concluye que el tratamiento (T2) empleando *Eleocharis sp.*, con medio filtrante (arena y grava) en el humedad subsuperficial horizontal fue el más eficiente, cumpliendo con los límites permisibles en fósforo, nitratos, nitritos, ST, turbidez y pH, por ser el género que presentó un rápido crecimiento, mayor número de raicillas, tamaño y presencia de tallos huecos, características morfológicas que podrían haber acarreado mayor cantidad de oxígeno hacia las raíces, promoviendo ambientes aeróbicos, apoyando la remoción de parámetros físico-químicos.

CAPÍTULO VI

6. RECOMENDACIONES

Realizar investigaciones con sistemas de humedales subsuperficiales con las especies macrófitas emergentes estudiadas, especialmente utilizando el género *Eleocharis* y con un tiempo de retención de al menos 30 días, para valorar la eficacia en la eliminación de DQO, DBO₅.

En las condiciones ambientales de la parroquia San Isidro del cantón Morona, se sugiere identificar las plantas de la zona especialmente de los géneros *Eleocharis* y *Cyperus*, para estudiar su efecto en la remoción de contaminantes físico químicos, probando diferentes tiempos de retención y medios filtrantes para su uso, en fitorremediación de aguas mieles producidas durante el lavado del café y trasplantarlas directamente porque ya están adaptadas.

Se recomienda adaptar a *Eichhornia crassipes* por un tiempo mínimo de 30 días en un sistema hidropónico para su aclimatación y posteriormente realizar riegos alternados con aguas mieles para su uso en humedales construidos de flujo subsuperficial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agudelo, L., Macias, K., & Suárez, A. (19 de Julio de 2005). Fitorremediación: la alternativa para absorber metales pesados de los biosólidos. *Revista Lasallista de Investigación*, *II*(1), 57-60. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/695/69520110.pdf>
- Aguilera, Y., Consuegra, R., & Rapado, M. (1988). *Treatment of coffee wastewater by gamma radiation*. Recuperado el 2 de Abril de 2021, de In: International Atomic Energy Agency (IAEA), editors. Symposium on radiation technology for conservation of the environment: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/575290>
- Álvarez, J., Smeltekop, H., Nicanor, C., & Loza, M. (2011). Evaluación de un sistema de tratamiento de aguas residuales del prebeneficiado de café, (*Coffea arabica*) implementado en la comunidad Carmen Pampa provincia Nor Yungas del Departamento de la Paz. *Journal of the Selva Andina Research Society*, *II*(1), 34-42. Obtenido de <http://www.scielo.org.bo/pdf/jsars/v2n1/a05.pdf>
- Anzueto, F. (Octubre de 2006). Las implicaciones del reglamento de aguas residuales para el sector. *El Cafetal, Revista el Caficultor*, *10*(1), 5-7. Recuperado el 26 de Marzo de 2021, de <https://fddocuments.ec/reader/full/las-implicaciones-del-reglamento-de-aguas-residuales-el-de-relacion-con>
- Arias, S., Betancur, F., Gómez, G., Salazar, J., & Hernández, M. (2010). Fitorremediación con humedales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador Técnico*2010, *74*, 12-22. Obtenido de http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/5/5
- Asociación de cafés especiales de Nicaragua. (2007). *ACEN*. Banco Interamericano de Desarrollo(BID). Managua-Nicaragua: TechnoServe. Inc. Recuperado el 25 de Marzo de 2021
- Asociación Nacional del Café (ANACAFÉ). (2013). *ANACAFE*. Recuperado el 25 de Marzo de 2021, de https://www.anacafe.org/glifos/index.php?title=Caficultura_BeneficiadoHumedo
- Ayala, R., Calderón, E., Rascón, J., & Collazos, R. (21 de Febrero de 2018). Fitorremediación de aguas residuales domésticas utilizando las especies *Eichhornia crassipes*, *Nymphoides humboldtiana* y *Nasturtium officinale*. *Revista de Investigación de agroproducción sustentable*, *II*(3), 47-53. doi:10.5281/zenodo.3946755
- Azabache, Y., Ruiz, A., Rodríguez, L., & Díaz, A. (2014). *Aprovechamiento sistémico de la pulpa de café como residuo agrícola y tratamiento de aguas mieles por bio remediación en Alto Mayo*. Tarapoto: Universidad Nacional de San Martín.
- Bres, P., Crespo, D., Rizzo, P., & La Rossa, R. (2012). Capacidad de las macrofitas *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes* para eliminar el níquel. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, *XXXVIII*(2), 153-157. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/864/86423631010.pdf>
- Brisson, J., & Chazarenc, F. (2009). Maximizing pollutant removal in constructed wetlands: should we pay more attention to macrophyte species selection?. *Science of the total environment*, *407*(13), 3923-3930. Recuperado el 11 de Junio de 2021, de <https://sci-hub.se/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969708006256>
- Brown, E., & Rodriguez, M. (2013). *Recursos para Agricultores, Nitrato en agua Potable*. California: Central Coast Regional Water quality Control Board. Obtenido de

https://www.waterboards.ca.gov/centralcoast/water_issues/programs/ag_waivers/docs/spanish_forms/nitratos_en_el_agua.pdf

- Cabrera, E., Hernández, L., Gómez, H., & Cañizares, M. d. (2003). Determinación de nitratos y nitritos en agua. Comparación de costos entre un método de flujo continuo y un método estándar. *Revista de la Sociedad de Química de México*, 47(4). Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0583-76932003000100014
- Cabrera, J. (2005). *Análisis del manejo post-cosecha del café coffea arábica en el cantón Piñas provincia de El Oro*. Recuperado el 23 de Marzo de 2021, de repositorio.utmachala.edu.ec: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/101>
- Calderón, F. (2015). *Métodos de Muestreo*. Bogota: Dr. Calderon labs. Obtenido de http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/Analisis_De_Aguas/Toma_De_Muestras.htm
- Carbonell, R. J., & Vilanova, T. (Noviembre de 1974). *Beneficiado rápido y eficiente del café mediante el uso de soda cáustica*. Recuperado el 2 de Abril de 2021, de San José, Costa Rica: Depto. de Estudios Técnicos y Diversificación: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=orton.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mnf=042233>
- Cárdenas, G., & Sánchez, I. (2013). Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el. *Universidad y Salud*, XV(1), 72-88. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/reus/v15n1/v15n1a07.pdf>
- Cardona, D. (12 de Enero de 2019). *La Industria del Café*. Obtenido de Almendra selecta: <https://www.cafealmendraselecta.com/blog/2019/01/12/la-industria-del-cafe/>
- Carpio, T. (2007). *Sólidos Totales secados a 103 – 105°C*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – República de Colombia. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Totales+secados+a+103+--+105%C2%BAC..pdf/d4faab4a-34e4-4159-bf4c-50353b101935#:~:text=Los%20s%C3%B3lidos%20son%20materiales%20suspendidos,al%20suministro%20de%20varias%20manera.&text=Los%20%E2%80%9>
- Castañeda, A., & Flores, h. (2014). Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante plantas macrófitas típicas en Los Altos de Jalisco, México. *Paakat: Revista de Tecnología y Sociedad*, 4(7), 33. Recuperado el 11 de Junio de 2021, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5815442>
- Celis, J., Junod, J., & Sandoval, M. (2005). Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. *Theoria*, 14(1), 17-25. Recuperado el 12 de Junio de 2021, de <https://www.redalyc.org/pdf/299/29900103.pdf>
- Cenicafé. (1977). *Subproductos del Café*. Recuperado el 31 de Marzo de 2021, de Centro Nacional de Investigación del Café: <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/806>
- Charris, J., & Osorio, A. (Diciembre de 2016). Eficiencia de eliminación de contaminantes del agua residual doméstica con humedales construidos experimentales plantados con *Cyperus ligularis* (Cyperaceae) y *Echinochloa colonum* (Poaceae). *Tecnologías y ciencias del agua*, VII(6), 93-103. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000600093#aff1

- Chen, S., Kao, C., Jou, C., Fu, Y., & Chang, Y. (2008). Use of a Constructed Wetland for Post-Treatment of. *ENVIRONMENTAL ENGINEERING SCIENCE*, 25(3), 407-418. doi:10.1089/ees.2007.0004
- Cherian, S., & Oliveira, M. (2005). Transgenic plants in phytoremediation: recent advances and new possibilities. *Environmental Science & Technology*, 9377 - 9390.
- Cléves, R. (1995). *Tecnología en beneficiado de café (No. 663.93 C635t)*. Recuperado el 2 de Marzo de 2021, de Alianza de Servicios de Información Agropecuaria (SIDALC): <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IscScript=earth.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=015227>
- Córdoba, N., & Guerreiro, E. (Julio-Diciembre de 2016). Caracterización de los procesos tradicionales de fermentación de café en el departamento de Nariño. *Bioteología en el sector Agropecuario y Agroindustrial*, XXIV(2), 75-83. doi:DOI:10.18684/BSAA(14)75-83
- Davidse, G., Chater, A., & Sousa, M. C. (1994). *Flora mesoamericana vol. 6 alismataceae a cyperaceae*. Recuperado el 12 de abril de 2021, de Universidad Nacional Autónoma: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=ADAMS%2C+C.D.+Schoenoplectus+En%3A+Flora+Mesoamericana.+Vol.+6%3A+Alismatacea+a+Cyperaceae.+Davidse&btnG=
- Delgadillo, A., González, C., García, F., Villagómez, J., & Sandoval, O. (2011). Fitoremediación: Una alternativa para eliminar contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*(14), 597-612. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/939/93918231023.pdf>
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio*. Cochabamba: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA). Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>
- Díaz, M., Gonzales, L., Ramirez, L., Olano, M., Vargas, A., Rojas, M., & Linares, G. (Octubre de 2017). Fenólicos a partir de residuos de café: Optimización del proceso de extracción. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 19(4), 405-410. doi:<http://dx.doi.org/10.18271/ria.2017.315>
- EcuRed. (13 de Octubre de 2014). *Macas (Ecuador)*. (J. Martínez, Editor) Recuperado el 30 de Abril de 2021, de [https://www.ecured.cu/index.php?title=Macas_\(Ecuador\)&action=info](https://www.ecured.cu/index.php?title=Macas_(Ecuador)&action=info)
- Elías, L. G. (1978). Composición química de la pulpa de café y otros subproductos. En J. E. Braham, & R. Bressani, *Pulpa de café: Composición, Tecnología y utilización* (pág. 152). Bogotá: Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá, INCAP. Recuperado el 1 de Abril de 2021, de Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá, Ciudad de Guatemala 19-29.: <https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/bitstream/handle/10625/4722/IDL-4722.pdf?sequence=1>
- Espinoza, M., & Monserrat, R. (2013). Efecto vertido aguas mieles en calidad físico-química del agua microcuenca Río Cuspire Yalí. *Revista científica de FAREM-Estelí. Medio Ambiente, Tecnología y Desarrollo Humano*(7), 43-53.
- Fedon, I. (2007). El género *Cyperus* L. (Cyperaceae, Liliopsidae) en el Herbario Nacional de Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía de La Universidad del Zulia*, 24(1), 183-189. Recuperado el 17 de Abril de 2021, de https://www.revfacagronluz.org.ve/PDF/supl_mayo_2007/v24supl32.pdf

- Fedón, I. C. (Julio de 2018). "El género *Eleocharis* R. Br. (Cyperaceae) para Venezuela, *Taxonomía y Fitogeografía*". Recuperado el 8 de Abril de 2021, de Universidad Central de Venezuela Facultad de Ciencias:
http://caelum.ucv.ve/bitstream/10872/20329/1/Tesis_Doctoral_Botanica_Eleocharis_ICF_2018_UCV.pdf
- Fernández, Y., Sotto, K., & Vargas, L. (2020). Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados. *Revista de Producción-Limpia*, XV(1), 93-110. doi:10.22507/pml.v15n1a7
- Figueroa, E., Pérez, F., & Godínez, L. (2014). *La producción y el consumo de café*. ECORFAN-Spain. Obtenido de https://www.ecorfan.org/spain/libros/LIBRO_CAFE.pdf
- Fórum Cultural del Café*. (2020). Obtenido de <https://www.revistaforumcafe.com/el-cafe-en-ecuador>
- Gamarra, A. (8 de Noviembre de 2008). *Historia infinita*. Recuperado el 2 de Enero de 2021, de Breve historia del café; Historia y leyendas:
<https://historiainfinita.wordpress.com/2008/11/08/breve-historia-del-cafe-historia-y-leyendas/>
- García de la Fuente, C. (7 de Noviembre de 2013). *Portal Veterinaria ALBEITAR*. Obtenido de Parámetros fisicoquímicos del agua: https://www.adiveter.com/ftp_public/A3081113.pdf
- García, A. (2008). *Evaluación de la cascarilla de café para utilizarse como sustrato en cultivo sin suelo de hortalizas*. Recuperado el 5 de Marzo de 2021, de tesis.ipn.mx:
<https://tesis.ipn.mx/jspui/handle/123456789/152>
- Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Morona Santiago. (2011). *Diagnóstico Estratégico de la Provincia de Morona Santiago*. Recuperado el 1 de Mayo de 2021, de Planificación Estratégica y Ordenamiento Territorial:
<https://moronasantiago.gob.ec/Descargas/rendiciondecuentas/2017/PDOT%202015-2019.pdf>
- Granados, M. (2018). *Estudio de Factibilidad de la implementación de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en ecosistemas de alta montaña en Toquilla*. Colombia: Universidad Libre. Obtenido de
<https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/11576/Proyecto%2C%20art%2C%20ADculo%20y%20plantilla%20congreso.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Guzmán, L., Villabona, Á., Tejada, C., & García, R. (2013). Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: Una Revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 16(1), 253-262. Obtenido de
<https://revistas.udca.edu.co/index.php/ruadc/article/view/881/1035>
- Hernández Robles, J., & Hidalgo Hidalgo, G. A. (2000). *Evaluación de 3 metodologías para reducir los niveles de contaminantes en efluentes del tratamiento primario de las aguas residuales del procesamiento del café en Costa Rica*. Recuperado el 5 de Abril de 2021, de (Tesis de licenciatura). Universidad EARTH. Guácimo, Costa Rica, p. 85.: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=rednia.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=013799>
- Herrera, J. J., Torres, I. D., Tascón, C. E., & Montoya, J. W. (2011). Colorimetría del fruto de café (*Coffea arabica* L.) durante su desarrollo y maduración. *Revista Facultad Nacional de*

Agronomía-Medellín, 64(2), 6229-6240. Recuperado el 3 de Marzo de 2021, de <https://www.redalyc.org/pdf/1799/179922664020.pdf>

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2010). *Guía técnica para el beneficiado de café protegido bajo una indicación geográfica ó denominación de origen*. Recuperado el 8 de Febrero de 2021, de Alianza de Servicios de Información Agropecuaria (SIDALC.net): <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=sibe01.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=033583>

Jaramillo, M., & Flores, E. (2012). *Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales Lemna minor (Lenteja de agua), y Eichornia crassipes (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera*. Cuenca. Tesis previa a la obtención de título de Ingeniero Ambiental: Universidad Politécnica Salesiana. Recuperado el 07 de Mayo de 2020, de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/2939>

Kunning, L., Junxian, P., Peicong, L., Jian, M., Quanlong, L., & Dngxing, Y. (2019). Determinación simultánea de nitrógeno total disuelto y fósforo total disuelto en aguas naturales con digestión térmica y UV en línea. *Rev.ion.*, 185(1), 419-426. doi:doi.org/10.1016/j.talanta.2018.03.085

Leal, G., & Morales, C. (1991). *Caracterización del Proceso de Comercialización del Café. Guatemala*. Recuperado el 5 de Febrero de 2021, de Small Farmer Coffee Improvement Project, AID-ANACAFE. Project, : https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Leal%2C+G.+y+Morales%2C+C.+Caracterizaci%C3%B3n+del+proceso+de+comercializaci%C3%B3n+del+caf%C3%A9+en+Guatemala.+G&btnG=

Leto, C., Tuttolomondo, T., La Bella, S. e., & Licata, M. (2013). Effects of plant species in a horizontal subsurface flow constructed wetland—phytoremediation of treated urban wastewater with *Cyperus alternifolius* L. and *Typha latifolia* L. in the West of Sicily (Italy). *Ecological engineering*, 61, 282-291. doi:10.1016/j.ecoleng.2013.09.014

López, D. (2014). *Composición química y nutracéutica del residuo sólido del café (Coffea arabica L) utilizado y la actividad de los productos de su fermentación colónica in vitro en un modelo de inflamación*. Tesis para obtener el Grado de Maestro en Ciencia y Tecnología. Programa de Posgrado en Alimentos del Centro de la República. Universidad Autónoma de Querétaro. Recuperado el 25 de Marzo de 2021, de Programa de Posgrado en Alimentos del Centro de la República (PROPAC). Facultad de Química. Universidad Autónoma de Querétaro.: <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/626>

Mendez, C. (2014). *Residuos de la industria del café para la producción de bioetanol*. Recuperado el 3 de Marzo de 2021, de Facultad de Ciencias Químicas Zona Xalapa.

Mendoza, C., & Párraga, A. (2021). *Evaluación de tres tipos de humedales artificiales (Ornamental, Forrajero y Alimenticio) comoo depurador de aguas residuales grises en el bosque de la ESPAM*. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López. Informe de titulación previo a la otención del título de Ingenieró en Medio Ambiente. Obtenido de <http://repositorio.espam.edu.ec/bitstream/42000/1448/1/TTMA34D.pdf>

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2010). *Manual de buenas prácticas de manufactura en el beneficio bio café oro de Tarrazú*. Programa de Fomento de la Producción Agropecuaria Sostenible, San Marcos de Tarazú. Recuperado el 26 de Marzo de 2021, de [infocafes.com: http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Q02-2808.pdf](http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Q02-2808.pdf)

- Molina, A., & Villatoro, R. (2006). *Propuesta de Tratamiento de aguas residuales en beneficios húmedos de café*. San Salvador: Universidad del El Salvador. Tesis previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil. Obtenido de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/4524/1/Propuesta%20de%20tratamientos%20de%20aguas%20residuales%20en%20beneficios%20h%C3%BAmedos%20de%20caf%C3%A9.pdf>
- Montero, A., & Sandí, J. (2009). La contaminación de aguas mieles en Costa Rica: Un conflicto con contenido ambiental. *Diálogos Revista Electrónica de Historia*, 10(1), 4-15. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/439/43913137001.pdf>
- Montesdeoca Hernández, K. F. (2019). *Evaluación de cyperus luzulae, en la remoción de cianuro en condiciones de laboratorio (Bachelor's thesis)*. Recuperado el 16 de Abril de 2021, de "Tesis de licenciatura" repositorio.utn.edu.ec: <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/8913/1/03%20RNR%20303%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>
- Morales, E., Oliva, S., Rascón, J., Manuel, M., Villegas, D., & Chávez, S. (4 de Noviembre de 2020). Sistemas de tratamiento de aguas mieles de café en la Provincia de Rodríguez de Mendoza, Perú. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales.*, VIII(1), 84-90. doi:10.23850/24220582.2918
- Morales, M. (Septiembre de 2014). *Análisis del proceso de beneficiado húmedo de café en Fraijanes, Guatemala*. La Asunción: Universidad Rafael Landívar. Recuperado el 9 de Marzo de 2021, de <http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2017/06/Morales-Mario.pdf>
- Mussatto, S., Ballesteros, L., Martins, S., & Teixeira, J. (2011). Extracción de compuestos fenólicos antioxidantes de posos de cafe usados. *Tecnologías de separación y purificación*, 83, 173-179. doi:10.1016/j.seppur.2011.09.036
- Niño, I., Aponte, M., Rodríguez, L., & Perico, N. (13 de Marzo de 2018). Fitorremediación en aguas residuales sin tratamiento previo. Caso: Tierra Negra, Boyacá. *Revista de Tecnología*, 17(1), 37-48. Recuperado el 7 de Mayo de 2021, de <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi66J-fjDwAhWJTt8KHVI2CnsQFjACegQIFhAD&url=https%3A%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F7390743.pdf&usq=AOvVaw0Qtl-3Cmnsd9BbWiPMi4qf>
- Noguera, J. (2009). *Plan de Marketing Turístico para el cantón Morona (Macas), provincia de Morona Santiago. Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Comercial*. Cuenca: Universidad del Azuay. Obtenido de <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/1657/1/07326.pdf>
- Núñez, R., Vong, Y., Borges, R., & Olguín, E. (2004). Fitorremediación: Fundamentos y Aplicaciones. *Ciencia*. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/8455/1/BQ%2056%20.pdf>
- Palacios, D. (2009). *Beneficio Húmedo Ecológico*. Guatemala: Asociación Nacional del Café. ANACAFE. Obtenido de <https://www.originicaffe.it/doc/beneficiadoh%FAmedodlemarcruz.pdf>
- Palta, G., & Morales, S. (Julio-diciembre de 2013). Fitodepuración de aguas residuales domésticas con Poaceas: *Brachiaria mutica*, *Pennisetum purpureum* y *Panicum maximum*, en el Municipio de Popayan, Cauca. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, XI(2), 57-75. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v11n2/v11n2a07.pdf>

- Pineda, C., Reyes, C., & Oseguera, F. (2012). *Beneficiado y calidad del café*. Recuperado el 8 de Marzo de 2021, de Manual de caficultora, 3.:
<https://www.coursehero.com/file/51371555/Capitulo-13pdf/>
- Poveda, A. (2014). *Evaluación de especies acuáticas flotantes para fitorremediación de aguas residuales industrial y de uso doméstico, previamente caracterizadas en el cantón Ambato provincia del Tungurahua*OVINCIA DE TUNGURAHUA. Ambato: Universidad Técnica de Ambato. Obtenido de
<https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/8455/1/BQ%2056%20.pdf>
- Poveda, R. (2014). *Evaluación de especies acuáticas flotantes para la Fitorremediación de aguas residuales industrial y de uso agrícola caracterizadas en el cantón Ambato, provincia de Tungurahua*. Ambato: Universidad de Ambato. Tesis previa a la obtención del título de Ingeniera Bioquímica. Obtenido de
<https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/8455/1/BQ%2056%20.pdf>
- Pozo, M. (2014). *Repositorio. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. (PUCE)*. Recuperado el 22 de Enero de 2021, de Análisis de los factores que inciden en la producción de café en el Ecuador 2000-2011: <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/6848>
- Quiñonez, B. (Junio de 2018). *Evaluación y monitoreo del uso de Lemna minor y Eichhornia crassipes como medida de fitorremediación de aguas residuales en las riveras del refugio de vida silvestre manglares estuario rio Esmeraldas*. Obtenido de Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Tesis previo a la obtención del título de Ingeniera en Gestión Ambiental:
<https://repositorio.pucese.edu.ec/bitstream/123456789/1605/1/QUI%c3%91%c3%93NEZ%20MINA%20%20BRENDA%20ELAINE.pdf>
- Ramirez, C., Oliveros, C., & Sanz, J. (2015). *Manejo de lixiviados y aguas de lavado en el proceso de beneficio húmedo del café*. Recuperado el 6 de Abril de 2021, de biblioteca.cenicafe.org:
<https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/608/1/arc066%2801%2946-60.pdf>
- Ramirez, M. (2010). *Análisis situacional de las fincas de café Coffea arábica y propuesta sustentable en la parroquia san roque del cantón piñas (en línea)*. Recuperado el 6 de Febrero de 2021, de Investigativo. Loja, Unviersidad Nacional de Loja.:
<https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/5540/1/Ramirez%20Criollo%20Milton.pdf>
- Rathinavelu, R., & Graziosi, G. (2005). *Posibles usos alternativos de los residuos y subproductos del café*. Italia: Departamento de Biología de la Universidad de Trieste. Recuperado el 6 de Abril de 2021, de Organización Internacional del Café, ITA.:
<https://ciberinnova.edu.co:10004/archivos/plantilla-ovas1-slide/documents-UCN-Canvas/impacto-ambiental/Unidad%202/5.%20Usos%20residuos%20del%20cafe.pdf>
- Redolfo, L., & Sandi, G. (2015). *Influencia del tiempo de retención y composición del sustrato en la remoción de hierro y cobre del drenaje ácido de mina en humedales artificiales*. Recuperado el 24 de Septiembre de 2021, de Universidad Nacional de Cajamarca :
<https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/UNC/1553/Tesis%20Gladys%20Licapa%20pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rodríguez, J., & Durán, C. (2006). Remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 21(1), 25-33. Recuperado el 25 de Septiembre de 2021, de
<https://www.redalyc.org/pdf/482/48221104.pdf>

- Rojo, E., & Perez, E. (2014). Café I (G. Coffea). *Reduca Biología*, 7(2), 113-132. Recuperado el 9 de Febrero de 2020, de <https://eprints.ucm.es/id/eprint/27835/1/1757-2066-1-PB.pdf>
- Romero, J. (2002). *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño*. Recuperado el 16 de Abril de 2021, de Bogotá, CO, Escuela Colombiana de Ingenieros.: <https://dspace.scz.ucb.edu.bo/dspace/bitstream/123456789/22876/1/11991.pdf>
- Romero, M., Colín, A., Sánchez, E., & Ortiz, 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*, 25(3), 157-167. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/370/37012012004.pdf>
- Sanchez, S., Bueno, D., & Jara, P. (2018). La realidad Ecuatoriana en la producción de café. *Revista Científica de la Investigación y el Conocimiento*, 2(2), 72-91. Recuperado el 26 de Enero de 2021, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6732775>
- Schrauf, T., & Smith, M. (2005). Humedales de tratamiento de drenaje de Mina. *Revista Minería*. Recuperado el 25 de Septiembre de 2021, de https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Schrauf%2C+T.%2C+%26+Smith%2C+M.+%282005%29.+Humedales+de+tratamiento+de+drenaje+de+Mina.+Revista+Miner%C3%ADa.+Lima.&btnG=
- Singler, A., & Jim, B. (2012). *Universidad Estatal de Montana Programa de Extención en Calidad del Agua Departamento de Recursos de la Tierra y Ciencias Ambientales*. Northern Plains Mountains. Regional Water Programs. Obtenido de http://region8water.colostate.edu/PDFs/we_espanol/Nitrate%202012-11-15-SP.pdf
- Sociedad de Fomento Agrícola Castellonense, S.A. FACSA. (23 de Enero de 2017). *FACSA*. Obtenido de <https://www.facsa.com/los-nitratos/>
- Somayo, A., Borrayo, B., Pérez, A., Morataya, M., & Montenegro, L. (2014). *Extracción de mucilago, azúcares y taninos de la pulpa de café y producción de ácido acético comercial a partir de aguas mieles de café*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Obtenido de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06_3706.pdf
- Soto, A., Vallejos, E., Herrera, F., & Rojas, C. E. (2004). *Algunas malezas de Costa Rica y Mesoamérica. Catálogo de terrestres, parásitas y acuáticas*. Recuperado el 20 de Abril de 2021, de Catálogo de terrestres, parásitas y acuáticas: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Algunas+malezas+de+Costa+Rica+y+Mesoamerica.+Cat%C3%A1logo+de+terrestres%2C+parasitas+y+acu%C3%A1ticas.+Universidad+de+Florida.&btnG=
- Soto, F., García, M., de Luis, E., & Becares, E. (1999). Role *Scirpus lacustris* in bacterial and nutrient removal from wastewater. *Water Science Technology*, 241-247. doi:0.2166/wst.1999.0168
- Stearman, G. K., George, D. B., Carlson, K., & Lansford, S. (2003). Pesticide Removal from Container Nursery Runoff in Constructed Wetland Cells. *Journal of Environmental Quality*, 32, 1548-1556. Recuperado el 12 de Junio de 2021, de <https://sci-hub.se/https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2134/jeq2003.1548>
- Suarez, J. (2012). *Aprovechamiento de los residuos sólidos provenientes del beneficio del café, en el municipio de Betania Antioquia: usos y aplicaciones*. Recuperado el 8 de Febrero de 2021, de Corporacion Universitaria Lasallista.: <http://infocafes.com/portal/wp->

content/uploads/2017/06/APROVECHAMIENTO_RESIDUOS_SOLIDOS_BENEFICIO_CAFE.pdf

- Suárez, J., Roa, M. C., Brown, S., & Vargas, W. (2002). *Guía Ilustrada de las plantas de las montañas del Quindío y los Andes Centrales*. Recuperado el 17 de Abril de 2021, de Inventario de plantas- pequeños humedales del Quindio: <https://ifs-plantas.sites.olt.ubc.ca/plantas/eleocharis-elegans/>
- Sun, C., Zhen, L., & Miah, M. (2017). Comparison of the ecosystem services provided by China's Poyang Lake wetland and Bangladesh's Tanguar Haor wetland. *Ecosystem Services*, 26, 411-421. Recuperado el 24 de Septiembre de 2021, de <https://sci-hub.mkxa.top/https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.02.010>.
- Suresh, B., & Ravishankar, G. (2004). Phytoremediation—A Novel and Promising Approach for Environmental Clean-up. *Critical Reviews in Biotechnology*, XXIV(2-3), 97-124. doi: 10.1080 / 07388550490493627.
- Tapia, Y., & Garcia, F. (Julio de 2013). La disponibilidad del fósforo es producto de la actividad bacteriana en el suelo y en ecosistemas oligotróficos: Una revisión Crítica. *Terra Latinoamericana*, 31(3). Recuperado el 30 de Junio de 2021, de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v31n3/2395-8030-tl-31-03-00231.pdf>
- Texto Unificado de Legislación Secundaria Ambiental; TULAS, MAE. (2005). *Libro VI Anexo 1. Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua*. Recuperado el 5 de Abril de 2021, de Presidencia de la república del Ecuador.: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu112180.pdf>
- Torres, L. S., Villarrea, A. S., Ramírez, A. A., & Serna, J. A. (2019). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de aguas mieles del beneficio del café. *Revista Ion*, 32(2), 59-66. Recuperado el 3 de Abril de 2021, de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/10619/10461>
- Valencia, N., & Alama, M. (2009). *Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas*. Recuperado el 10 de Marzo de 2021, de [semanticscholar.org](https://pdfs.semanticscholar.org/859e/3e23d49349dc40abccff91938af3828cb939.pdf): <https://pdfs.semanticscholar.org/859e/3e23d49349dc40abccff91938af3828cb939.pdf>
- Vanaclocha, B., & Cañigüeral, S. (2003). *Fitoterapia: vademécum de prescripción*. Recuperado el 9 de Febrero de 2021, de Academia.edu: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/54222814/Vademecum_Presentacion.pdf?1503502739=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DFITOTERAPIA_VADEMECUM_DE_PRESCRIPCION_Be.pdf&Expires=1612889366&Signature=UXL06pn8q~nFDkd90dLZvYQHggqt3kuhA806iC9naDa5a
- Vanegas, F. (31 de Agosto de 2016). *Coffee Media*. Obtenido de <https://www.yoamoelcafedecolombia.com/2016/08/31/taxonomia-del-cafe/>
- Venegas, S., Orellana, D., & Pérez, P. (2018). La realidad Ecuatoriana en la producción de café. *Revista Científica de Investigación actualización del mundo de las Ciencias*, 2(2), 72-91. doi:10.26820/recimundo/2.(2).2018.24-44
- Vymazal, J. (2013). Vymazal, J. (2013). El uso de humedales artificiales híbridos para el tratamiento de aguas residuales con especial atención a la eliminación de nitrógeno: una revisión de un desarrollo reciente. *Investigación sobre el agua*, 47(14), 4795-4811.

Recuperado el 12 de Junio de 2021, de <https://sci-hub.se/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135413004375>

Wu, S., Kusch, P., Brix, H., Vymazal, J., & Dong, R. (2014). Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review. *Water research*, 57, 40-55. Recuperado el 23 de Septiembre de 2021, de <https://sci-hub.mkxa.top/10.1016/j.watres.2014.03.020>

ANEXOS

Anexo 1: Cálculo volúmenes sustrato

$$H1 = 26,5 - 12 \text{ cm}$$

$$H1 = 14,5 \text{ cm}$$

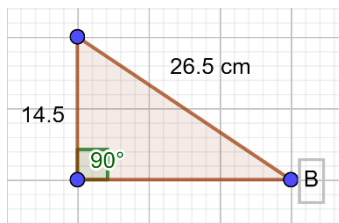
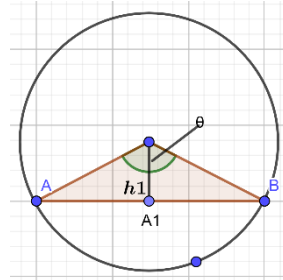
$$A = \frac{r^2}{2} \left(\frac{\theta * 2\pi}{360} - \text{sen}(\theta) \right)$$

$$A = \frac{0,265^2}{2} \left(\frac{113,65 * 2\pi}{360} - \text{sen}(113,65) \right)$$

$$A1 = 0,03748 \text{ m}^2$$

$$V = A1 * h$$

$$V1 = 0.0344 \text{ m}^3 \text{ "RIPIO"}$$



$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{14,5}{26,5} \right)$$

$$\alpha = 56,82^\circ$$

$$\theta = 113,65^\circ$$

$$H1 = 6 \text{ cm}$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{6}{26,5} \right)$$

$$\alpha = 76,913^\circ$$

$$\theta = 153,82^\circ$$

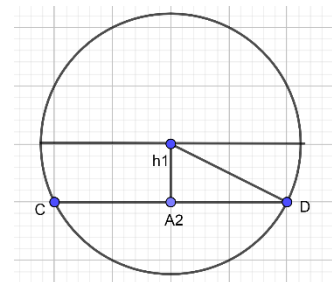
$$A2 = \frac{0,265^2}{2} \left(\frac{153,82 * 2\pi}{360} - \text{sen}(153,82) \right)$$

$$A2 = 0,0787 \text{ m}^2$$

$$V2T = 0,07247 \text{ m}^3$$

$$V2 = V2T - V1$$

$$V2 = 0.0344 \text{ m}^3$$



AUTORIZACION DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Igor Ismael Neira Reibán portador(a) de la cédula de ciudadanía N° **0106832868**. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación : **“FITORREMEDIACIÓN DE AGUAS MIELES DE *Coffea arabica* UTILIZANDO MACRÓFITAS ACUÁTICAS”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos y no comerciales. Autorizo además a la Universidad Católica de Cuenca, para que realice la publicación de éste trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, **28 de septiembre de 2021**

F: 

Nombres y Apellidos

C.I. 0106832868