



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

REMOCIÓN DE MERCURIO EN AGUAS RESIDUALES DE LA ACTIVIDAD  
MINERA CON EL USO DE MICROALGAS.

Trabajo de Titulación presentado en conformidad a los requisitos establecidos  
para optar por el título de Ingeniero Ambiental en Prevención y Remediación

Profesor Guía

Ing. Daniel Hernán Hidalgo Villalba, M.Sc

Autor

Fernando Nicolás Vela García

Año

2016

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos para un adecuado desarrollo del tema escogido, y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

---

Daniel Hernán Hidalgo Villalba

Máster en Ciencias de la Ingeniería Ambiental

C.I.: 180191444-9

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”.

---

Fernando Nicolás Vela García

C.I.:171557970-0

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi madre, quien con todo su esfuerzo y amor incondicional ha sido mi apoyo y ejemplo a seguir; a mi padre por su constancia y mi hermana querida; a la M.Sc Nory Gonzales quien con sus conocimientos colaboró durante toda la investigación; al Ing. Daniel Hidalgo por su dedicación y motivación durante todo este proceso; al Laboratorio BIOTEC y a la Corporación para la Investigación Energética CIE, por la oportunidad y los recursos brindados; a la M.Sc Cristina Guamán por su valiosa asesoría en biología; a mis queridos amigos quienes han estado presentes a mi lado disfrutando de mis alegrías y apoyándome en mis tristezas más profundas, mis más sinceros y gratos agradecimientos.

## **DEDICATORIA**

Este logro se lo dedico a mi hermano, al cual no he dejado de amar con todas mis fuerzas ni un solo día y es mi inspiración y mi felicidad a diario para levantarme y conquistar mis sueños; a toda mi hermosa familia, en especial a mi madre quien es mi todo y ha hecho el máximo esfuerzo por verme culminar mi carrera; a mis abuelitas que me cuidan desde el cielo; a mis queridos amigos; a quien durante esta etapa me acompañó con todo su amor y felicidad iluminando mis días con tanta vida enseñándome que el verdadero amor tiene varias formas inclusive el de una ardilla, Ángela. A todos ustedes por su amor y apoyo incondicional, esto es para ustedes.

## RESUMEN

La minería en el Ecuador es una actividad que se ha desarrollado desde hace varias décadas y en la actualidad se proyecta con cinco intervenciones a gran escala, sin embargo, involucra procesos que de una u otra manera pueden producir impactos al ambiente, sobre todo por la emisión de efluentes contaminantes líquidos, sólidos y gaseosos.

Con una economía que cada día tiende a depender menos del petróleo, es necesario impulsar la explotación responsable de minerales, que contribuya al cambio de la matriz productiva garantizando la integridad del ambiente.

Por tal motivo, el presente trabajo de titulación tiene como objetivo evaluar la eficiencia mediante un proceso de fitorremediación utilizando los géneros de microalgas nativas del Ecuador *Pleurococcus*, *Scenedesmus* y *Chlorella* en la remoción de: mercurio, fosfatos, sulfatos y nitratos de aguas residuales producidas durante la extracción artesanal de oro,

El proceso llevado a cabo, consistió en comparar la capacidad de adaptación de los géneros de microalgas así como su capacidad de absorción y adsorción de los contaminantes de agua residual colectada del punto de descarga de una de las plantas de beneficio, ubicado a orillas del río Calera, cantón Portovelo, provincia de El Oro. Los tres géneros fueron cultivados para el tratamiento del agua en forma individual y como un consorcio en cuatro fotobioreactores, manteniéndose constantes las condiciones de funcionamiento para cada tratamiento propuesto y aplicándose CO<sub>2</sub> como fuente nutricional.

Se realizó la caracterización de los parámetros estudiados en el agua residual y en el agua tratada, determinándose que todos los tratamientos fueron eficientes ya que se redujo considerablemente la concentración de contaminantes. Comparativamente, el género de microalga con el que mayor porcentaje de remoción de mercurio se obtuvo, fue el *Pleurococcus*. con un 93%, mientras que en la remoción de fosfatos, sulfatos y nitratos, el consorcio de géneros alcanzó mejores resultados con 93%, 76% y 97% respectivamente.

## ABSTRACT

Mining is an activity in Ecuador that has been developed over several decades and currently projects five large scale interventions. However, this involves processes that can impact on the environment, especially in the form of poisonous emissions such as effluent liquids, solids and gases.

With an economy that is becoming increasingly less dependent on oil it is necessary to promote the sustainable exploitation of minerals, this in turn will help to change the production method which will guarantee the integrity of the environment.

Therefore, the main aim of this research is to evaluate the efficiency of the removal of Mercury, Phosphates, Sulfate, and Nitrates from the waste water produced during Gold Mining. This would be achieved via a process of Phytoremediation and with the use of native species of micro algae such as, *Pleurococcus* sp, *Scenedesmus* sp, and *Cholera* sp.

The purpose of the process is to compare the capacity of adaption in the Micro Algae and their absorption in containments of waste water collected from the discharge point from one of the mills. This particular mill is located on the riverside of Calera Portovelo in the province of El Oro. The three species were cultured for water treatment individually and as part of a consortium of four Photobioreactors. There operating conditions for each of the proposed treatments must be constantly maintained and CO<sub>2</sub> applied as a natural resource.

Characterisation of the parameters in both the waste and treated water were carried out, concluding that all treatments were effective because the concentration of containments was significantly reduced. The Algae that achieved the highest rate of mercury removal was *Pleurococcus* sp, 93% of the Mercury was removed from this Microalgae. With regard to the removal of Phosphates, Sulphates and Nitrates the percentages achieved were 97%, 93% and 76% respectively.

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
ALCANCE.....	2
JUSTIFICACIÓN.....	3
OBJETIVOS .....	5
Objetivo General.....	5
Objetivos Específicos.....	5
1. CAPITULO I: MARCO TEÓRICO.....	6
1.1. Minería .....	7
1.1.1. Situación nacional.....	7
1.1.2. Minería en Portovelo.....	8
1.1.3. Minería artesanal de oro .....	9
1.2. Impacto ambiental de la minería artesanal de oro .....	10
1.2.1. Impacto ambiental por emisión de metales pesados .....	12
1.3. Fitorremediación.....	14
1.3.1. Microalgas .....	15
1.3.2. Biosorción.....	18
2. CAPÍTULO II: METODOLOGÍA.....	21
2.1. Caracterización del agua residual .....	22
2.1.1. Colecta de agua.....	22
2.1.2. Caracterización físico-química del agua residual.....	25
2.2. Implementación del sistema de tratamiento .....	27
2.2.1. Selección de cepas de microalgas .....	27
2.2.2. Tratamiento del agua residual .....	35
2.3. Eficiencia de los tratamientos .....	38

2.3.1. Diseño experimental .....	38
2.3.2. Cinética de crecimiento en los fotobioreactores .....	40
2.3.3. Remoción de mercurio.....	41
<b>3. CAPÍTULO III: RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>	<b>42</b>
3.1. Implementación del sistema de tratamiento de aguas.....	43
3.1.1. Selección de cepa de microalga.....	43
3.2. Caracterización del agua residual antes y después del tratamiento.....	50
3.3. Eficiencia de los tratamientos .....	51
3.3.1. Cinética de crecimiento en los fotobioreactores .....	51
3.3.2. Absorbancia de mercurio.....	54
3.3.3. Porcentaje de remoción.....	57
<b>4. CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>82</b>
4.1. Conclusiones.....	82
4.2. Recomendaciones.....	84
<b>5. REFERENCIAS.....</b>	<b>85</b>
<b>6. ANEXOS.....</b>	<b>95</b>

## INTRODUCCIÓN

La contaminación al ambiente con metales pesados representa una de las principales problemáticas a nivel mundial, ya que se genera por distintos procesos industriales, tales como, la metalurgia, curtiembre, minería, producción de baterías, galvanizados, etc. (Núñez, 2013, pp. 32-36). Estos procesos causan un deterioro constante al ambiente, debido a que, una vez vertidos en el agua y superficie terrestre, los metales pesados presentan el riesgo de volverse tóxicos en altas concentraciones y acumularse en los distintos niveles de la cadena trófica (Mansilla, Lizama, Gutarra y Rodríguez, 2012, p.66).

Los efluentes generados en los distintos procesos de la actividad minera contienen cantidades muy elevadas de metales pesados, lo que implica un impacto en fuentes de agua, aire y suelo; siendo uno de ellos, el vertido directo de efluentes contaminados a cuerpos hídricos, según manifiestan Ospina, Montoya y García (2012, p. 36). Se consideran de alta toxicidad los siguientes metales: plomo, mercurio y cadmio. Cuya función biológica no ha sido descubierta aún (Volesky, 2011, p.156).

Graeme y Pollack (1998, pp. 46-50) sostienen que el mercurio es uno de los contaminantes más dañinos del ambiente por su grado de toxicidad y facilidad de ingreso en organismos vivos, afectando de esta manera la dinámica de la cadena trófica.

De manera general Bermeo (2005. p. 45) afirma que los tratamientos y métodos tecnológicos que se utilizan en la recuperación de mercurio representan un alto costo de inversión, ya que requieren de mucha energía o gran cantidad de reactivos químicos y pueden generar otros desechos igualmente tóxicos. Además, pueden no ser tan eficientes en concentraciones altas del contaminante alcanzando únicamente porcentajes de remoción por debajo del 60%.

El uso de microalgas presenta un alto potencial de biorremediación, estos microorganismos unicelulares son capaces de sintetizar la luz solar mediante fotosíntesis y se caracterizan por una gran capacidad de adaptación ecológica y una plasticidad bioquímica muy notable (Soto, 2013, pp.13-18). Adicionalmente,

la biomasa que se produce a partir de estos microorganismos presenta sitios aptos para ligar o retener iones metálicos (Albarracín, 2007, p.18).

El Laboratorio de Biotecnología Energética, BIOTEC, tiene como objetivo el estudio de microalgas como parte del Catálogo y de la Colección de Microalgas Nativas del Ecuador; y, su bioprospección para la obtención de productos con valor biotecnológico. El presente trabajo de titulación se realizará con el apoyo técnico del BIOTEC con el fin de seleccionar los géneros de microalgas con capacidad de remoción de contaminantes, su identificación, caracterización y escalamiento en nivel piloto de un sistema de biorremediación para aguas residuales contaminadas con mercurio (Laboratorio de Biotecnología Energética, 2015).

La finalidad de esta investigación fue el estudiar el tratamiento de aguas residuales de la actividad minera contaminadas con mercurio a partir del uso de microalgas aisladas en sistemas lacustres del Ecuador.

## **ALCANCE**

El alcance para el presente proyecto de investigación fue el de implementar un sistema de remoción de mercurio en aguas residuales de la actividad minera con el uso de microalgas nativas del Ecuador. El proceso de remediación estuvo enfocado en la concentración de mercurio del agua residual proveniente de la extracción de oro, en el cantón Portovelo, provincia de El Oro, para ser tratada mediante procesos biológicos a partir del uso de microalgas. Se realizó la selección e identificación de los géneros de microalgas nativas del Ecuador pertenecientes a la Colección de Microalgas para Investigación del Ecuador, CMIE, del Laboratorio de Biotecnología Energética, BIOTEC, para procesos de biorremediación de aguas con metales pesados.

Además de elaborar medios de cultivo para el crecimiento idóneo de las microalgas a escala laboratorio, también se las cultivó en el agua residual colectada para los tratamientos propuestos. Por otra parte se escogió un modelo experimental y estadístico que permitió observar el comportamiento de las microalgas respecto a las variables determinadas para la investigación, como el

género de microalga empleado, concentración del contaminante o el porcentaje de remoción, con el fin de estudiar la biodegradación del mercurio, fosfatos, sulfatos y nitratos en aguas residuales mediante procesos metabólicos aeróbicos de biosorción de microalgas.

Finalmente se determinó la eficiencia del proceso de biorremediación en aguas residuales contaminadas con mercurio midiendo los parámetros físico-químicos antes y después de los tratamientos.

## **JUSTIFICACIÓN**

Según Wang y Chen (2009, pp. 3-9) uno de los principales aspectos negativos que enfrenta la industria minera, es la contaminación al ambiente por metales pesados, debido a la falta de tratamiento y sitios para la disposición final de los efluentes generados en los procesos para la obtención de oro. Una de las características de estos contaminantes es la bioacumulación en la cadena trófica o la capacidad de biomagnificarse dentro de los ecosistemas acuáticos. Además de provocar intoxicación en los seres humanos.

La actividad minera en el Ecuador se ha desarrollado desde hace varios siglos atrás; la provincia de El Oro, cantones Zaruma y Portovelo son considerados como la zona geográfica de mayor explotación minera, abarcando actualmente un 85% de la explotación nacional (Agencia de Regulación y Control Minero, 2013). Lugar donde se localiza la mayor cantidad de minas a pequeña y gran escala para la extracción de oro. La explotación de este mineral requiere un proceso específico, por tal motivo, en los últimos años han surgido numerosos molinos y plantas de cianurización en la zona (Betancourt *et al.*, 2001, p.5).

Como consecuencia a los daños ocasionados a la población y al ambiente, los municipios correspondientes decidieron regular y reubicar este tipo de instalaciones a las riveras de los ríos Calera y Amarillo, exponiendo a las comunidades de la cuenca (Volesky, Weber y Park, 2003, p.7).

La Agencia de Protección Ambiental (2014) manifiesta que presencia de mercurio en el ambiente implica un alto riesgo por su toxicidad, así como su efecto en los seres vivos, ya que tiene la capacidad de acumularse en tejidos

blandos y afecta al cerebro, riñones y feto. Lo concuerda con la Organización Mundial de la Salud (2013) la cual ha determinado que el mercurio elemental y el metilmercurio son tóxicos para el sistema nervioso central y el periférico. Se han identificado síntomas por subproductos del mercurio como las sales inorgánicas, que son corrosivas para la piel, ojos y el tracto intestinal.

La exposición ocurre por vías respiratorias o al ingerir alimentos o agua contaminados. Debido a esto surge la necesidad de monitorear y tratar las aguas contaminadas con mercurio (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2009).

El presente trabajo de investigación hace referencia al Texto Unificado Legislación Secundaria, Medio Ambiente, (TULSMA), Libro VI "Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua". Acuerdo ministerial 097-A. Que establece 0.005 mg/L como la concentración máxima permisible de descargas hacia cuerpos hídricos receptores para Mercurio total (Hg).

En la actualidad, existen diferentes métodos físico-químicos para el tratamiento de los efluentes líquidos provenientes de la actividad minera que contienen metales pesados, entre los cuales destacan principalmente: el intercambio iónico, precipitación, ósmosis inversa y absorción. Pese a que se logra alcanzar una alta eficiencia en la remoción de metales pesados con estos métodos, aún existen grandes desventajas al momento de su aplicación. Específicamente, en efluentes de gran volumen constituidos por soluciones metálicas diluidas. Otra de las desventajas identificadas, es el alto costo de operación, ya que se requiere una gran cantidad de energía y productos químicos. Aunque se ha demostrado que la precipitación química es efectiva para la remoción de metales pesados, crea al mismo tiempo una nueva problemática ambiental: la producción de lodos que tendrán que ser almacenados para su respectivo tratamiento (Monge, Guerrero y Armendáriz, 2009, p. 19).

Una de las alternativas potenciales sobre los métodos convencionales para la recuperación de metales pesados en aguas procedentes de la actividad minera según Monge, Guerrero y Armendáriz (2009, p. 21) es el uso de microorganismos mediante biosorción; el principio de este fenómeno se basa en las interacciones físico-químicas entre la biomasa y el metal.

En la última década, el proceso de biosorción, que aprovecha la capacidad de ciertos tipos de biomasa en fijar elementos metálicos de soluciones acuosas, ha sido investigado con mayor atención por su alto potencial para el tratamiento de aguas residuales. Varias investigaciones sugieren que la biomasa producida por diferentes especies de microalgas, hongos y bacterias tienen la capacidad de concentrar, en su estructura, iones metálicos, presentes en las aguas residuales de la actividad minera (Romo, 2002, pp.5-8).

Pellón *et al.* (2013, pp.175-180) expresan que debido a la capacidad de biosorción de metales pesados por la biomasa de microalgas, la cual aproximadamente, alcanza el 90% de remoción, se planteó en el presente trabajo de titulación, la evaluación del posible uso de microalgas autóctonas del Ecuador, para la adsorción de mercurio de aguas contaminadas de la actividad minera.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

La remoción de mercurio en aguas residuales de la actividad minera con el uso de microalgas nativas del Ecuador.

### **Objetivos Específicos**

- Implementar un sistema con una capacidad de 5 litros que permita realizar el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la actividad minera mediante biosorción con microalgas.
- Caracterizar la composición del agua residual colectada con mercurio antes y después del tratamiento biológico con microalgas mediante análisis físico-químicos.
- Comparar la eficiencia en la remediación de aguas residuales, entre los géneros de microalgas usados en los tratamientos.

## 1. CAPITULO I: MARCO TEÓRICO

En la figura 1 se muestra un breve resumen de los puntos a ser tratados en el capítulo.

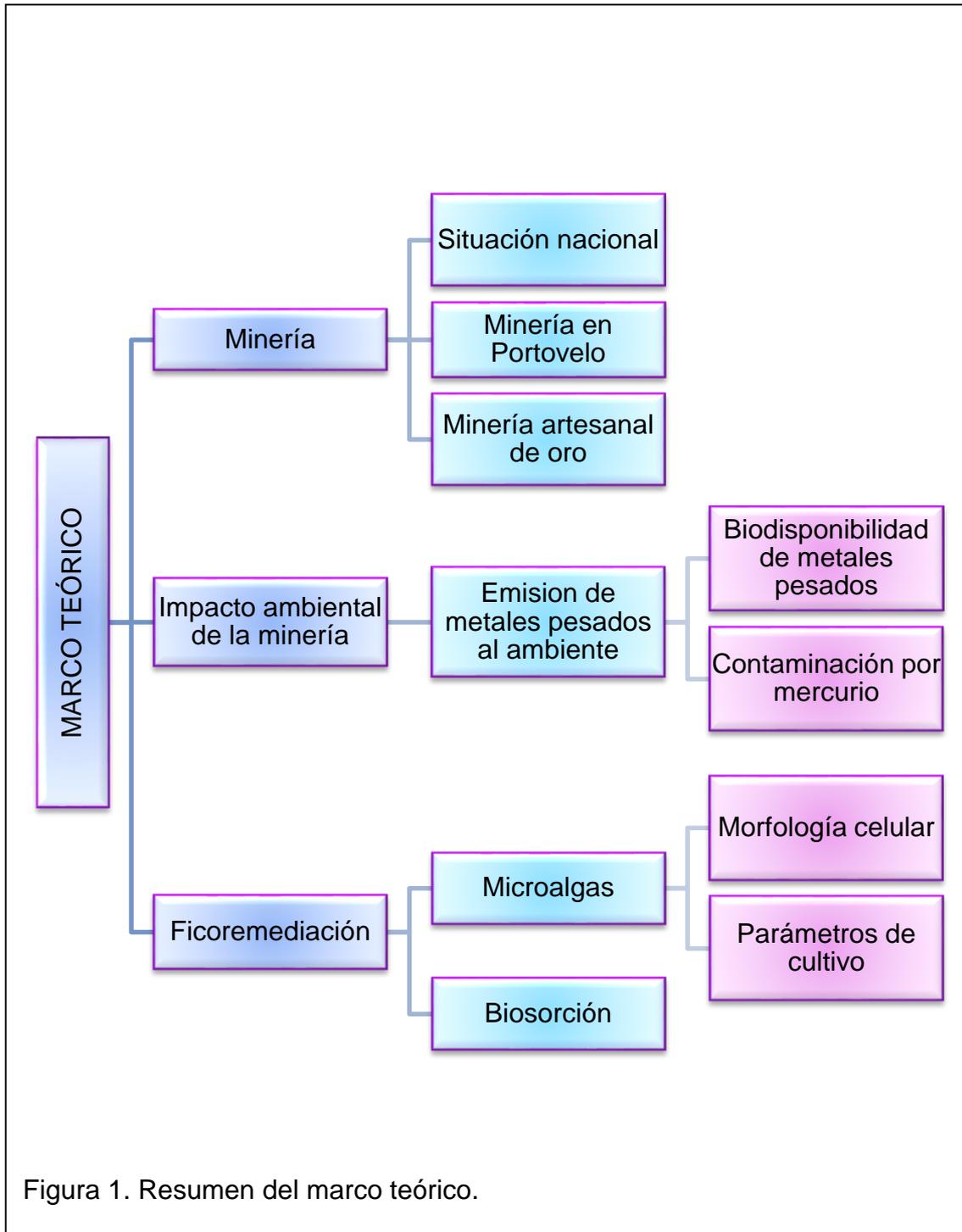


Figura 1. Resumen del marco teórico.

## **1.1. Minería**

De acuerdo con autores como Cisneros (2008, pp.7-16) la minería es la actividad productiva que consiste en la extracción selectiva de minerales y otros materiales que se han acumulado en la corteza terrestre. Lo cual concuerda con Torres (2014, pp. 23-24) quien manifiesta que la minería es la actividad económica primaria que tiene una relación directa con la exploración y extracción de metales de origen natural de los cuales se puede generar una ganancia o beneficio económico.

### **1.1.1. Situación nacional**

Según el Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos (2015, p.25) el territorio ecuatoriano cuenta con una gran diversidad geológica derivada de procesos evolutivos y cambios generados en la corteza terrestre a través del tiempo; debido a su ubicación dentro del principal accidente geográfico de Sur América, el Ecuador cuenta con una diversificación de 3 regiones fisiográficas distintas en geomorfología, geología y mineralogía. Por lo cual hace a éste, un país con altas oportunidades para el crecimiento de proyectos de extracción minera, acompañado de regulaciones para un desarrollo productivo basado en principios de sostenibilidad y responsabilidad ambiental. La minería es catalogada hoy en día como un sector estratégico para el crecimiento y cambio de la matriz productiva del país.

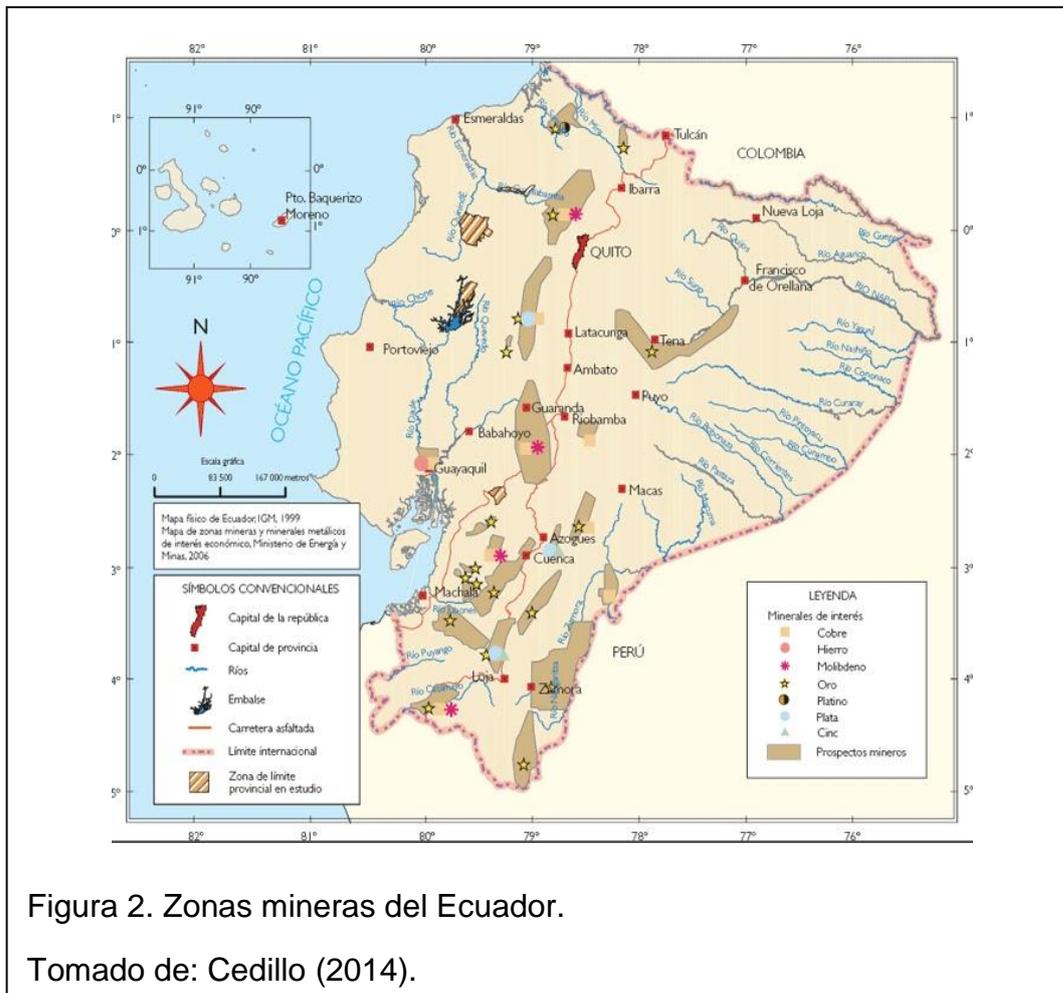
En la actualidad la actividad minera constituye el 14% del PIB del país y cuenta con 5 proyectos a gran escala, destinados a la explotación de oro, plata, cobre y molibdeno (Banco Central del Ecuador, 2014).

La minería ilegal en el Ecuador fue combatida a partir de la creación de la Ley Minera en 2009, logrando la reducción de esta actividad, a través del Artículo 81 que contempla el cierre definitivo de minas y confiscación de maquinaria que intervenga en cualquier actividad ilegal de minería (Ley de Minería, 2009, Art.81). En la investigación de Mora (2012, pp. 35-48) se determina que, entre las principales provincias del Ecuador con mayor potencial minero se encuentran: El Oro, Esmeraldas, Zamora, Morona Santiago, Napo e Imbabura. Sin embargo,

actualmente la provincia de El Oro encabeza la lista con el 85% la extracción total de minerales a nivel nacional, gracias a la explotación minera de sus cantones Zaruma y Portovelo, la cual data desde el siglo XV.

Debido al desarrollo minero del cantón Portovelo, éste fue seleccionado como el área de estudio en la presente investigación.

En la Figura 2 se puede observar la distribución de la explotación minera en el Ecuador.



### 1.1.2. Minería en Portovelo

Los cantones de Zaruma y Portovelo conforman uno de los cuatro distritos mineros del Ecuador, el cual es considerado el más importante del país por su capacidad de producción y antigüedad. Se encuentra localizado en las faldas de

la cordillera occidental al suroeste del Ecuador, en la provincia de El Oro (Beltrán y Eguiguren, 2010, pp. 56-59).

La minería en este sector es antigua y la mayoría de yacimientos son explotados de forma artesanal, sin embargo, también existen empresas dedicadas a la minería a gran escala responsables y constituidas legalmente (Carrión, 2010, pp. 25-33). Acorde a lo manifestado por Betancourt *et al.* (2001, p. 2), la actividad minera en la zona de Portovelo se ha venido desarrollando desde la época precolombina hasta la actualidad, siendo su fuerte la explotación de oro. Para este proceso es necesario el tratamiento del mineral, por lo que en los últimos 25 años se han instalado numerosos molinos y plantas de cianurización en las zonas urbanas y rurales del cantón.

Aproximadamente, existen 109 plantas de beneficio en el distrito minero de Zaruma- Portovelo, 85 de las cuales son de pequeña producción, es decir, que emplean procedimientos artesanales y carecen de maquinaria que intervenga en el tratamiento del mineral, además de contar con un número reducido de personal. La mayoría de estas plantas forman parte de la Asociación de Propietarios de Plantas de Beneficio, Fundición y Refinación de Sustancias Minerales de la provincia de El Oro, cuya sede está ubicada en el cantón Zaruma (Khun, 2011, pp. 46-48).

### **1.1.3. Minería artesanal de oro**

Según la Ley de Minería (2009) el Artículo 134 se establece que se considera minería artesanal a la actividad económica que se realiza mediante trabajo individual, familiar o asociativo autorizado y regulado por el Estado ecuatoriano, la cual se caracteriza principalmente por el uso de herramientas y maquinaria simples destinadas a la extracción de minerales cuya distribución en el mercado en general cubre únicamente las necesidades básicas de las personas o grupos familiares vinculados a dicha actividad.

La minería aurífera artesanal es considerada como la mayor fuente de emisión intencional de mercurio al ambiente, debido a que en el procesamiento del mineral se utilizan grandes cantidades de mercurio y cianuro, exponiendo a los

trabajadores a sustancias tóxicas (Veiga *et al.*, 2010, pp. 76-82). Además de, representar un riesgo para las comunidades cercanas por la contaminación de las fuentes hídricas (Veiga, Velásquez y Hall, 2010, p. 23).

A continuación en la tabla 1. Se describe el proceso de extracción del mineral de forma artesanal.

Tabla 1. Fases de la extracción artesanal de oro.

No.	Fase	Descripción
1	<b>Extracción del mineral</b>	Hace referencia a la extracción de la materia prima de filones auríferos o vetas usando cinceles y macetas. Generalmente, el oro está incrustado en formaciones de cuarzo.
2	<b>Trituración</b>	Proceso mecánico para triturar las formaciones de cuarzo extraídas, usando chancadoras.
3	<b>Molienda</b>	Al moler el material triturado se obtiene un polvo fino, con lo cual se libera las partículas de oro del resto de componentes.
4	<b>Bateo</b>	Separación de oro del resto de minerales y componentes de la pulpa debido a la diferencia de densidades.
5	<b>Amalgamación</b>	Se procede a mezclar las partículas de oro con mercurio. Se obtiene una amalgama de oro y mercurio.
6	<b>Quema</b>	Se realiza un lavado minucioso de la amalgama, removiendo los restos de hierro y arenas finas. La amalgama es secada y quemada en la retorta. El producto final es oro puro.

Adaptado de: Pillajo (2011, pp. 4-8)

## 1.2. Impacto ambiental de la minería artesanal de oro

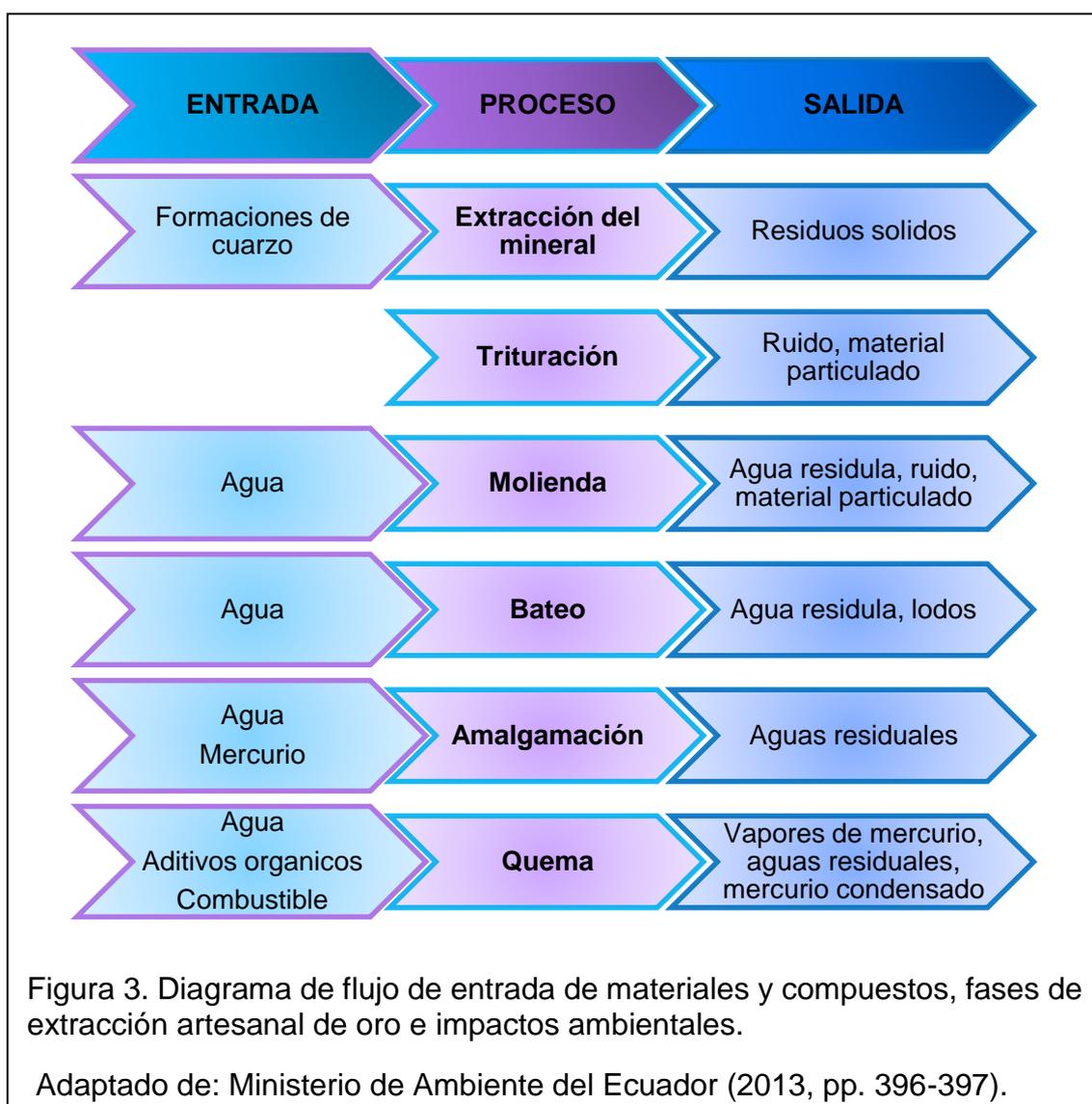
La minería aurífera a lo largo de los años ha cambiado de intensidad y lugar. Es catalogada como una actividad a corto y mediano plazo, generando efectos negativos al ambiente que pueden perdurar largos periodos de tiempo, causados por el uso de sustancias químicas en la recuperación (cianuro y mercurio) y refinamiento del oro, además de, la gran cantidad de agua requerida para el proceso (Herrera y Millones, 2012, pp.56-57).

Según el MAE (2014, p.396) los impactos ambientales negativos afectan la calidad de los recursos aire, agua y suelo, además de, constituir un riesgo para

la seguridad laboral y salud de los trabajadores. Los impactos positivos son la fuente de empleo y la generación de actividades comerciales.

La problemática ambiental asociada a la actividad de extracción artesanal aurífera es causada principalmente por el manejo inapropiado de sustancias químicas peligrosas, afectando significativamente a los ecosistemas y comprometiendo de forma prolongada la salud de los seres humanos (Espinoza, 2008, p.14).

A continuación en la Figura 3 se muestra el diagrama de flujo de la extracción artesanal de oro.



La calidad del agua, suelo y aire es afectada por el uso de sustancias químicas altamente tóxicas como el mercurio, además de, ser un riesgo para la salud ocupacional del personal (Johnson, 2011, pp. 23-29). El impacto positivo es netamente económico, al generar fuentes de empleo para la localidad (Sacher y Acosta, 2012, pp.75-80).

### **1.2.1. Impacto ambiental por emisión de metales pesados**

Hursthouse (2008, pp. 49-56) determina que uno de los principales impactos causados por la actividad minera es el deterioro y afectación al ambiente por la contaminación de metales pesados, tales como el cobre, plomo, mercurio, cadmio, níquel, cromo, zinc, entre otros, a suelos y cuerpos de agua, alterando su estructura química y comprometiendo sus futuros usos. Particularmente en el caso de sedimentos y suelos, depende estrictamente del producto, es decir la capacidad de complejamiento entre la interacción de metales con los componentes del ambiente bajo condiciones fisicoquímicas y biológicas del entorno.

Kim, Ma, Allen y Cha (2002, pp. 275-280) manifiestan que al ser sustancias químicas no degradables, los metales únicamente, pueden distribuirse a través del ambiente por aire, agua o suelo, en ciertas circunstancias cambiando su estado de oxidación o al incorporarse en el organismo de los seres vivos.

#### **1.2.1.1. Biodisponibilidad de metales pesados**

La biodisponibilidad se refiere a la capacidad de los metales a ser captados por los seres vivos para poder ejercer su toxicidad. La biodisponibilidad del metal en el ambiente se encuentra determinada por las condiciones físico-químicas del mismo, las cuales ayudan a calcular la especiación, es decir, la concentración del metal lábil y libre. Es necesario conocer la biodisponibilidad del metal en un ecosistema para poder determinar el grado de contaminación. Una de las principales características de los metales es su alta toxicidad y persistencia en el ambiente. El daño a los seres vivos ocurre de manera directa, al bloquear las

actividades biológicas, es decir, inactivación enzimática debido a la formación de enlaces entre los grupos sulfhidrilos de las proteínas y el metal, como consecuencia se producen daños permanentes en los diferentes órganos (Krishnamurti y Naudi, 2009, pp. 991-1004).

#### **1.2.1.2. Contaminación por mercurio**

De acuerdo a Mesquidaz, Negrete y Hernández (2013, p.535) el mercurio es catalogado como uno de los elementos químicos con mayor índice de toxicidad y afectación directa a la salud humana y a los ecosistemas, este puede ser generado por procesos naturales tales como emisiones volcánicas, volatilización desde medios acuáticos, emisión de gases de materiales geológicos y volatilización a partir de vegetación y por actividades de índole antropogénico, las cuales son: combustión de carbón para generación de energía eléctrica, procesos industriales como producción de cloro-alcalí, fertilizantes, pilas, pulpa de papel, refinación de combustibles, incineración de residuos municipales, crematorios y en mayor índice de importancia la minería a grande y pequeña escala. Según estudios realizados por la Organización Mundial de la Salud (2012), alrededor de 2500 toneladas de mercurio son emitidas anualmente por emisiones a raíz de actividades humanas.

El mercurio ha sido utilizado en la actividad minera a pequeña y grande escala desde sus inicios; durante la etapa de amalgamación y quema se genera contaminación directa por emisión y vertimiento hacia los componentes suelo, aire y agua, afectando a trabajadores y población circundante del área de explotación (García, 2013, pp.2-3).

Por otra parte Gaona (2004, pp. 21-23) manifiesta que el mercurio es altamente volátil por lo que genera una rápida incidencia de dispersión en el ambiente, además tiene una gran capacidad de bioacumulación y biomagnificación en organismos como mamíferos, plantas, invertebrados acuáticos y terrestres, aves, peces y anfibios y ecosistemas. Al ingresar en la cadena trófica y causa alteraciones significativas desde sus niveles más bajos hasta el ser humano, por

lo que es considerado uno de los elementos químicos más peligrosos y objeto de estudio e interés a nivel mundial.

Entre los efectos adversos en la salud humana por exposición o inhalación prolongada de vapores de mercurio, Marín (2011, pp.20-21) señala al sistema nervioso central como el principal afectado, causando parálisis parcial o total, daño en la visión, audición y coordinación, además de, daños en el cerebelo, dolor muscular, dificultad respiratoria, afectación a pulmones por hemoptisis y en ocasiones neumonitis intersticial ocasionando hasta la muerte. Al ser ingerir mercurio el riñón es el órgano diana, desarrollando síndrome nefrítico y causando gastroenteritis ulcerosa y necrosis tubular aguda.

### **1.3. Ficorremediación**

La ficorremediación es considerada por Talano, González y Paisio (2012, pp. 119-146) como un proceso biotecnológico, usado principalmente para procesos de remediación ambiental, removiendo nutrientes y contaminantes de aguas residuales, a través del uso de microalgas o macroalgas.

Este proceso presenta varias ventajas, entre las cuales destaca el bajo costo de implementación y operación, además de, múltiples campos de aplicación a nivel comercial e investigativo (Virginia, 2010, pp. 58-63). Salazar (2008, pp. 61-66) concuerda en que debido al rápido desarrollo y crecimiento junto a la capacidad de adaptación y remoción de las microalgas y macroalgas, han despertado gran interés dentro del campo de la investigación en remediación ambiental y en la implementación de cultivos de microalgas a gran escala para el tratamiento de aguas residuales y producción de proteínas.

Según González y Saldarriaga (2008, pp. 45-49) uno de los principales beneficios en el proceso de remoción y tratamiento biológico, es la capacidad de la biomasa en fijar contaminantes como: nitritos, nitratos, amonio y ortofosfatos. Investigaciones recientes han utilizado géneros como *Chlorella* sp. y *Scenedesmus* sp. para realizar el tratamiento de distintos tipos de agua residual proveniente de industrias, domicilios, deriva de excretas y plantas de tratamiento tradicionales, obteniendo resultados positivos y alentadores (Hanumatha, Ranjith, Raghavan, y Subramanian, 2011, p. 22).

Oswald, Gotaas, Ludwig, y Lynch (1953, pp. 692-706) determinaron que durante el proceso de remoción en efluentes contaminados, se desarrolla una relación simbiótica entre las microalgas y bacterias, indispensable para poder completar el tratamiento, produciendo funciones positivas en sus interacciones. Esta interacción está conformada por dos etapas: la primera donde gracias a la fotosíntesis las microalgas producen oxígeno, y la segunda etapa en donde las bacterias aerobias aprovechan esto como sustento durante la degradación orgánica. A continuación en la figura 4 se muestra el proceso descrito.

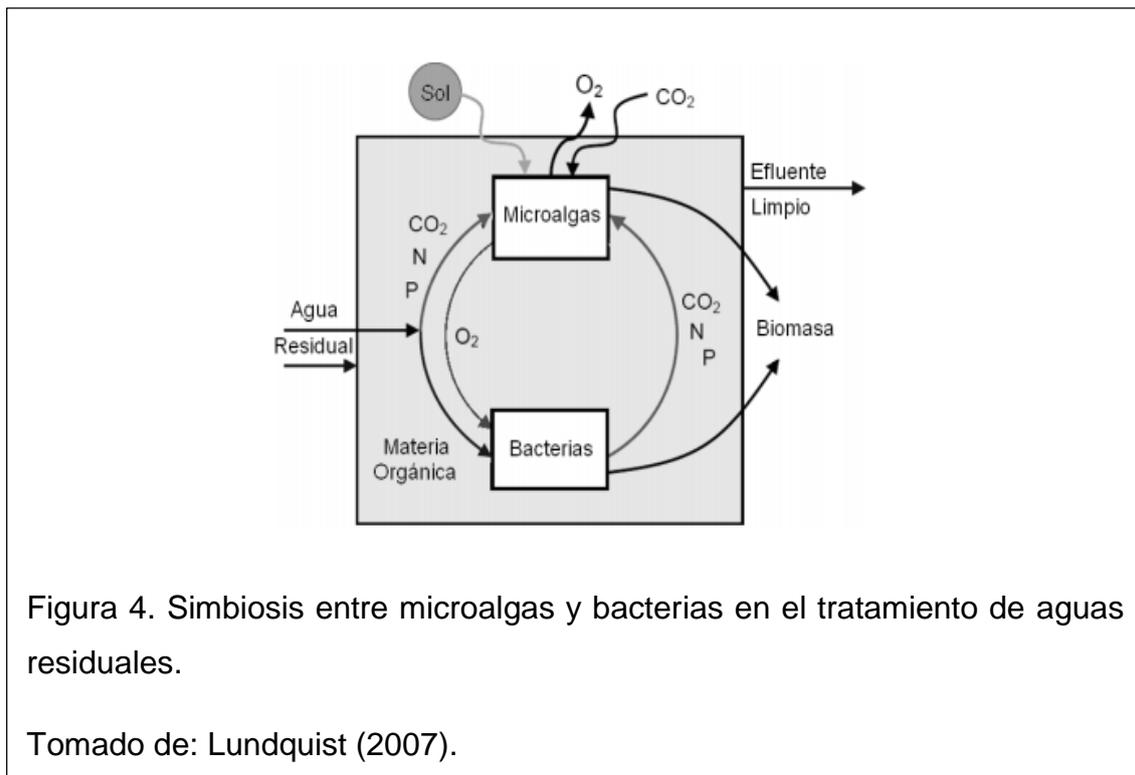


Figura 4. Simbiosis entre microalgas y bacterias en el tratamiento de aguas residuales.

Tomado de: Lundquist (2007).

### 1.3.1. Microalgas

De acuerdo a Andersen (2005, p. 47) las microalgas son organismos unicelulares fotosintéticos que contienen pigmentos que les dan colores variados, por ejemplo la clorofila-*a* y clorofila-*b* son tonos verdosos en algas, la clorofila-*c* está presente en diatomeas y algas pardas, y la clorofila-*d* se encuentra presente en algas rojas, éstos les permiten transformar la energía lumínica proveniente del sol en energía química, utilizando sustratos inorgánicos como CO<sub>2</sub> y agua como

donador primario de electrones, sintetizando materia orgánica y liberando oxígeno.

Las microalgas son organismos eucariotas y por su gran capacidad de adaptación a distintas condiciones ambientales se encuentran presentes en la mayoría de ecosistemas acuáticos donde las condiciones mínimas necesarias como, luz, fuentes de carbono, temperatura adecuada y nutrientes existen (Barsanti, 2006, pp. 56-62). Según afirma Fernández (2009, p.2) existe una gran biodiversidad representada por múltiples especies en distintos ecosistemas; marinos o limnológicos. Al no generar estructuras reproductoras las microalgas tienen una tasa de crecimiento mucho mayor a la de plantas superiores y por ende una mayor producción de biomasa al duplicarse en tan solo horas.

Debido al alto contenido de proteínas, lípidos y carbohidratos actualmente las microalgas son consideradas como fuente nutricional para los seres vivos, así como una valiosa alternativa de biocombustible que ha sido ampliamente estudiada y aplicada en la última década, con excelentes resultados. Además, estos microorganismos han demostrado ser importantes para la reducción de niveles de contaminación debido a su capacidad de captar CO<sub>2</sub> y asimilar nitrógeno (Portilla, 2010, pp. 3-7).

#### **1.3.1.1. Morfología celular de las microalgas**

Pese a la gran variedad de tamaño, forma y color las microalgas se caracterizan por estar compuestas por todos los orgánulos correspondientes a las células eucariotas, además de, orgánulos propios como la mancha ocular y el perinoide. La mancha ocular cumple la función de ser un fotoreceptor primitivo, mientras que el perinoide es donde las enzimas y sustratos se concentran y se realiza la función de conversión y traslocación de los grupos fotosintéticos (Bellinger y Sigee, 2010, pp. 84-87).

La mayoría de microalgas cuentan con pared celular, cuya composición puede variar dependiendo de la especie. Su metabolismo es similar al de plantas superiores y su reproducción es asexual a través de autoesporas producidas por los esporangios, o también por fisión binaria, el tiempo de duplicación puede

variar desde 1 hora hasta 24 horas. Poseen un aparato fotosintético que proporciona gran cantidad de pigmentos y componentes como citocromos y ácidos poliinsaturados de cadena larga. Las microalgas presentan una compleja composición bioquímica que varía dependiendo de la especie (Fernández, 2014, pp. 6-11).

### **1.3.1.2. Parámetros de cultivo de microalgas.**

Las microalgas al ser organismos vivos requieren de diferentes parámetros que deben ser considerados para realizar con éxito un cultivo, entre las cuales están las condiciones físicas del medio circundante (luz, pH, temperatura), mismas que desempeñan un papel muy importante en el crecimiento y asimilación de nutrientes, estos pueden ser limitantes si no se encuentran en valores adecuados aprovechables. A continuación se mencionan los principales factores para el cultivo de microalgas:

#### **a) Luz**

La intensidad lumínica es uno de los principales factores a tomar en cuenta dentro de un cultivo de microalgas ya que es la fuente de energía para el proceso de fotosíntesis, dependiendo de la especie a cultivar se debe considerar la cantidad, calidad y fotoperiodo para evitar la afectación al crecimiento y la síntesis de nutrientes orgánicos como carbohidratos, proteínas, y lípidos (Hernández y Labbé, 2014, p.3).

#### **b) Temperatura**

La producción de microalgas incrementa proporcionalmente con la temperatura hasta alcanzar el punto óptimo dependiendo del tipo de especie seleccionada, sin embargo se considera que entre los 28 y 35 °C los microorganismos alcanzan una tasa de crecimiento alta; cuando la temperatura sobrepasa los niveles óptimos se incrementa la respiración celular y reduce la producción global de las microalgas (Hernández y Labbé, 2014, p.4).

### **c) Potencial de Hidrógeno y CO<sub>2</sub>**

El pH óptimo para la mayoría de especies de microalgas es básico y oscila en el rango de 7 a 9, sin embargo este se ve alterado por diversos factores como la respiración, composición iónica, productividad y eficiencia del sistema de adición de dióxido de carbón; los valores ácidos normalmente causan la muerte de los microorganismos y afecta a la solubilidad de distintos compuestos dentro del medio de cultivo (Portilla. A, 2010, p.5).

La adición de CO<sub>2</sub> en el sistema de cultivo mejora las condiciones de crecimiento y productividad, además de, regular el pH. Esto se puede realizar a través de un sistema centralizado de inyección de dióxido de carbono (Hernández y Labbé, 2014, p.4).

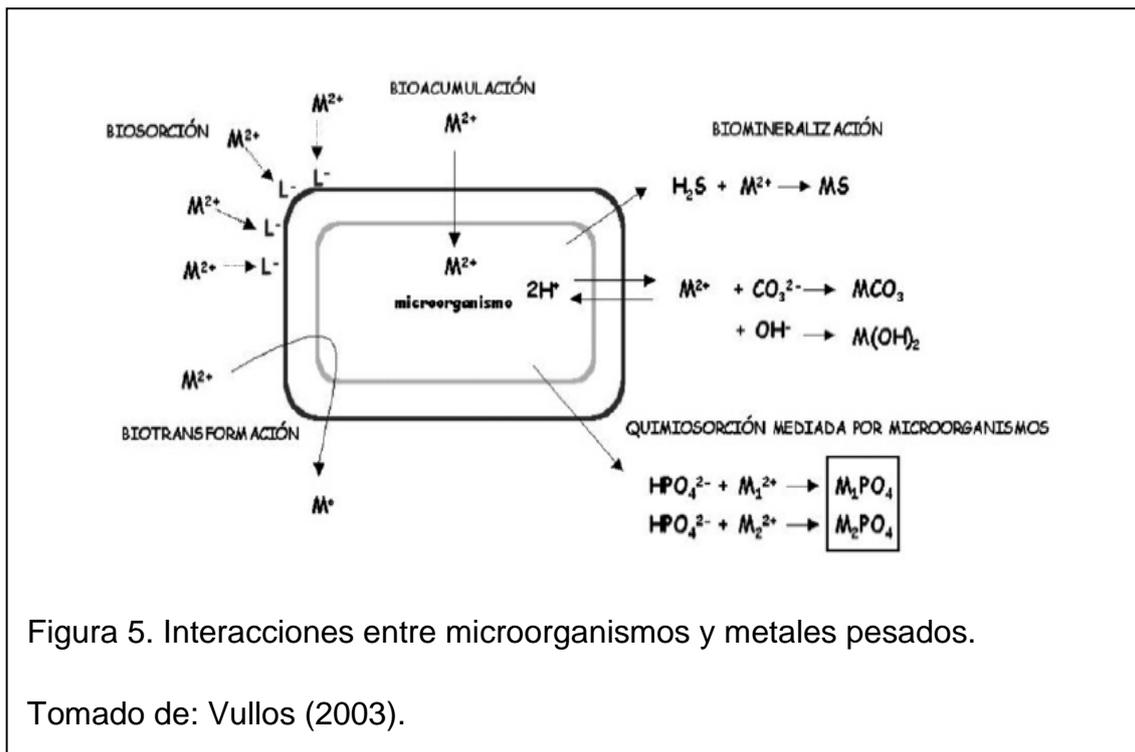
### **d) Nutrientes**

El nitrógeno está considerado como el segundo nutriente más importante para el crecimiento de las microalgas después del carbono, este es asimilado por las microalgas en forma de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) o como amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), además es un factor crítico en la regulación de lípidos (Portilla. A, 2010, p.5).

### **1.3.2. Biosorción**

Toda interacción realizada entre microorganismos y metales u otros elementos químicos como nitrógeno, carbono, fosforo y azufre son parte fundamental de los ciclos biogeoquímicos. Dichas interacciones son estudiadas con el principal objetivo de proponer una metodología de remoción, recuperación y/o detoxificación de radionúclidos y metales pesados (Valls y De Lorenzo, 2002, pp. 327-338).

A continuación en la Figura 5 se muestra la interacción de los metales pesados y microorganismos.

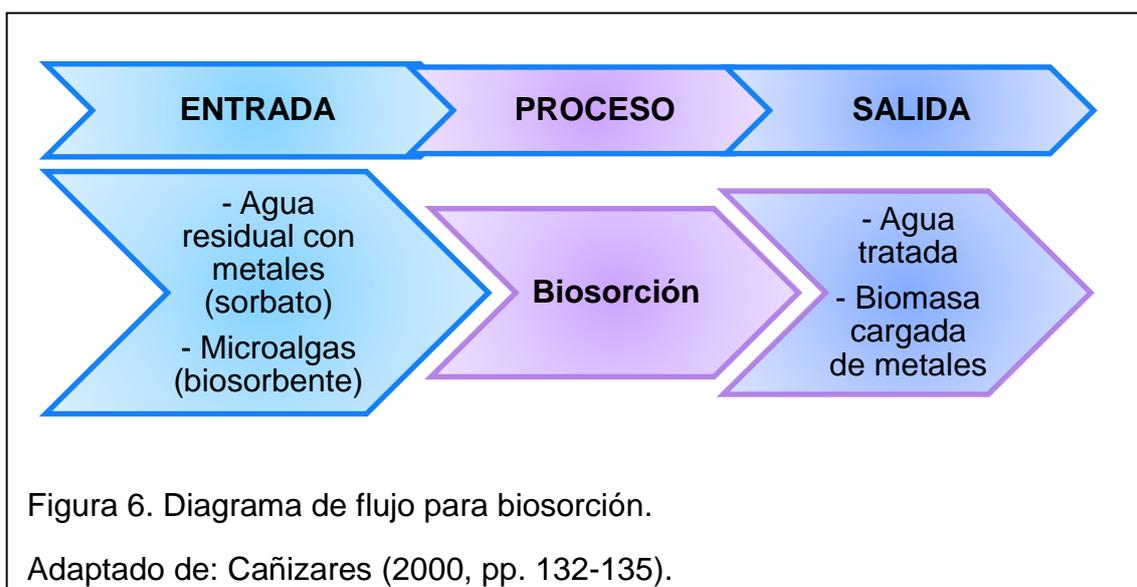


El principio de biosorción describe apropiadamente el proceso de remoción de mercurio en aguas residuales de la actividad minera empleando microalgas. Este fenómeno es ampliamente investigado y aplicado para la remediación de aguas contaminadas con metales pesados. Se denomina biosorbente a la pared celular de los microorganismos utilizados en el tratamiento y puede ser biomasa viva o muerta; en el caso de la biomasa viva es aislada y cultivada, su principal característica es la de retener o inmovilizar iones metálicos (sorbatos) de medios sólidos o líquidos (solvente, generalmente agua) en intervalos de tiempo relativamente cortos. Al disminuir el tiempo de remoción, se minimiza el costo operacional, además de no necesitar ningún tipo de nutriente adicional en el sistema. Para que el fenómeno de biosorción logre la retención del metal, se produce una interacción físico-química entre los ligandos de la superficie celular y el metal (Febrianto et al., 2009, p.9). Dicha interacción se lleva a cabo con grupos funcionales ubicados hacia el exterior de la célula, pertenecientes a moléculas que componen la pared celular como aminos, carboxilos, fosfato, sulfhidrilos e hidroxilos (Vullo, 2003, pp. 95-98).

Cuizano y Navarro (2008, pp. 3-8) sostienen que la biosorción se produce de manera continua, hasta establecer un equilibrio entre el sorbato disuelto y el sorbato biosorbido por los microorganismos. La eficiencia de la biomasa está dada por la capacidad de atraer y retener uno o varios sorbatos en un periodo de tiempo determinado. El tratamiento de agua contaminada con metales pesados con el uso microorganismos es considerado como un proceso biotecnológico de descontaminación y recuperación, una vez que la biomasa ha removido los iones metálicos del medio, es posible recuperar la biomasa viva y reingresarla al ciclo de biorremediación. Para remover los metales sin destruir la célula se emplean químicos suaves que disminuyan el pH, si no se desea reutilizar la biomasa, se pueden utilizar métodos más drásticos como la incineración.

Si el sistema emplea células vivas como biosorbente, se puede utilizar uno o varios tipos de biomasa mezclando microorganismos y plantas superiores, por ejemplo la combinación de algas y bacterias, en el tratamiento de aguas residuales de la curtiembre, donde se han obtenido porcentajes de remoción mayores al 99% en zinc, cadmio, mercurio, cobre y hierro (Gale y Wixson, 2012, pp. 259-264).

En la Figura 6 se muestra el diagrama de flujo de la remoción de metales en soluciones acuosas.



## 2. CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

En la figura 7 se muestra un breve resumen de los puntos a ser tratados

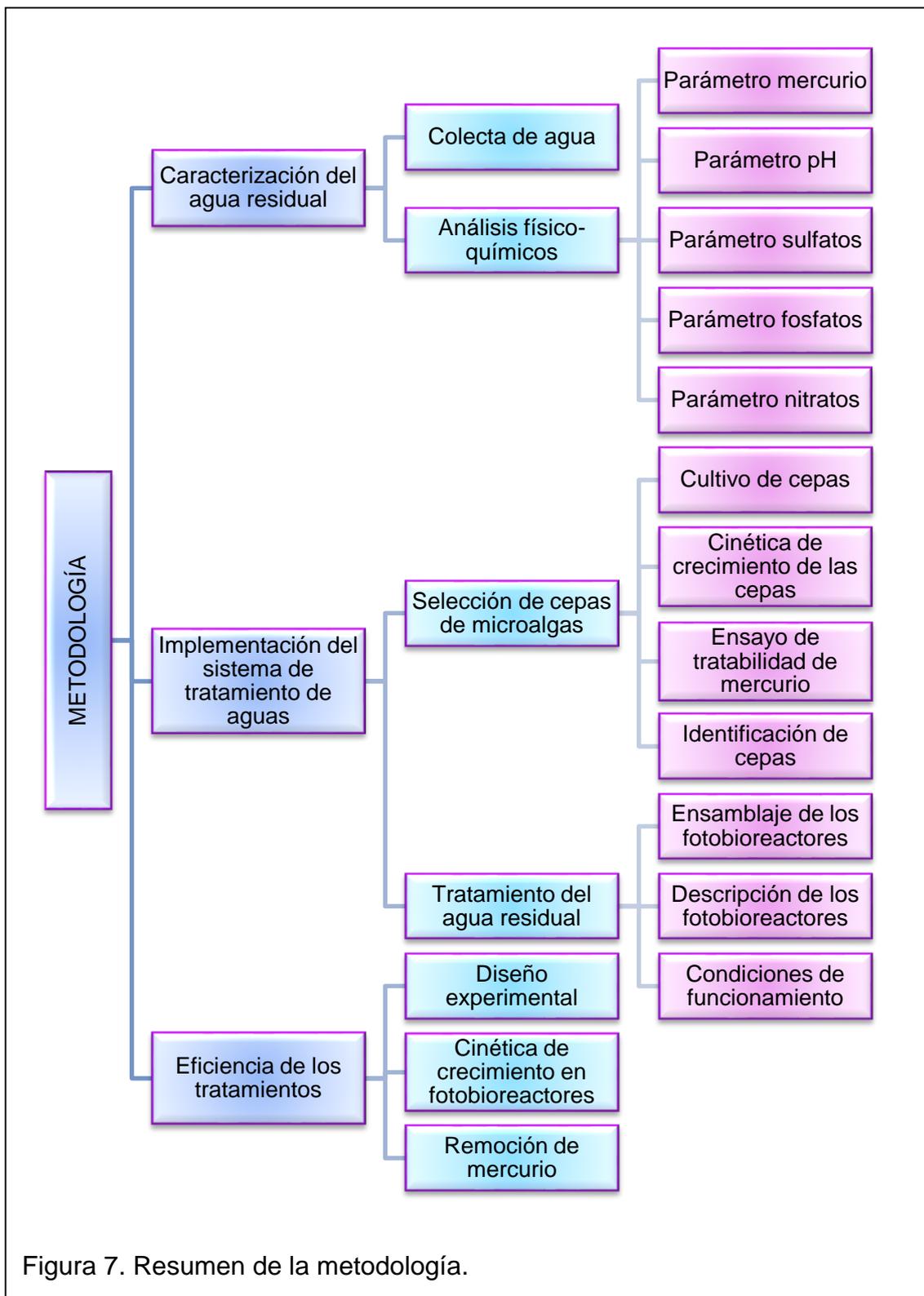


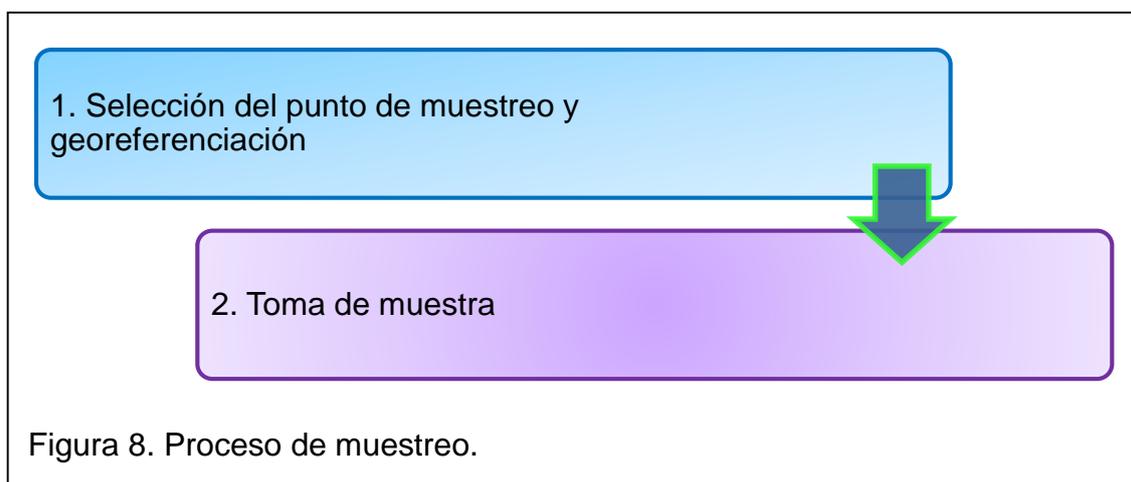
Figura 7. Resumen de la metodología.

## 2.1. Caracterización del agua residual

### 2.1.1. Colecta de agua

Se tomó una muestra del agua residual generada en una planta de beneficio del distrito minero Zaruma-Portovelo, ya que es una fuente crítica en la generación de contaminación por la extracción y refinación del oro. El agua colectada posteriormente sirvió como medio de cultivo para las microalgas en el sistema de biorremediación propuesto.

En la figura 8 se muestra el proceso empleado para la toma de la muestra del agua residual para ser tratada.



#### 2.1.1.1. Selección y georeferenciación del punto de muestreo

La muestra fue tomada del punto de descarga de una de las plantas de beneficio ubicadas a orillas del río Calera, en el cantón Portovelo, provincia de El Oro.

Se georeferenció el punto de muestreo para obtener la localización exacta mediante el uso del GPS marca Garmin® Etrex 30.

La tabla 2 muestra las condiciones físicas presentes al momento de la colecta.

Tabla 2. Ficha de muestreo

Muestra	Lugar de muestreo	Fecha	Hora	Temperatura (°C)	pH	GPS coordenadas N	GPS coordenadas E
1	Río Calera	19-May-15	9:00	26	7	651725	9589731

A partir de las coordenadas obtenidas, se elaboró el mapa del sitio donde se colectó la muestra, el cual se muestra a continuación en la figura 9.

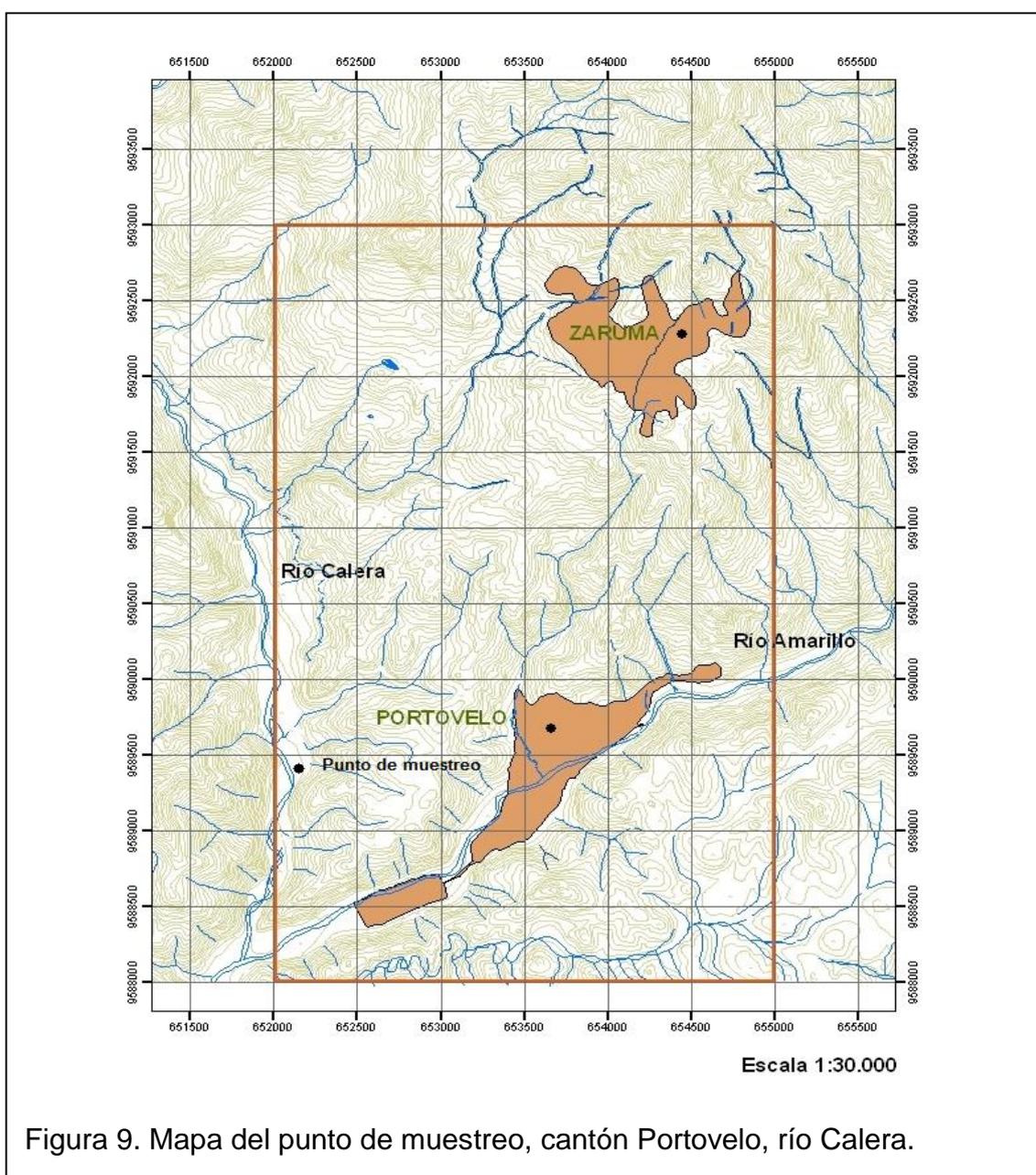


Figura 9. Mapa del punto de muestreo, cantón Portovelo, río Calera.

### **2.1.1.2. Toma de muestra**

El muestreo se lo realizó acorde a la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 169:98 “Agua. Calidad del agua. Muestreo. Manejo y conservación de muestras”. Se emplearon tres envases oscuros de 50, 40 y 30 litros. Cada recipiente fue curado con la misma agua residual de donde se extrajo la muestra. Adicionalmente, se tomaron muestras de agua en envases de vidrio oscuro de 500 mL. (previamente esterilizados) para el análisis de mercurio, en este caso los envases no se llenaron en su totalidad para permitir su agitación de ser necesaria, evitando contaminación por derrames o salpicaduras. Además, las muestras fueron acidificadas hasta un pH inferior a 2 empleando ácido nítrico como establece la norma.

Una vez etiquetados y sellados todos los envases, se procedió a su almacenamiento y refrigeración en contenedores apropiados a una temperatura aproximada de 5°C.

En la figura 10 se puede observar las características antes descritas en la colecta del agua residual.



Figura 10. Proceso de la colecta de agua.

- A) Río Calera
- B) envases para la toma de muestras
- C) preparación de las muestras
- D) georeferenciación del sitio.

### 2.1.2. Caracterización físico-química del agua residual

En cada tratamiento se realizó un análisis físico-químico del agua residual inicial y final para el levantamiento de información de la línea base y de los resultados obtenidos. La información obtenida determinó la capacidad de remoción de las microalgas sobre el mercurio, sulfatos, fosfatos y nitratos, y la incidencia que

tienen estos microorganismos sobre el pH. El diagrama de proceso para la preparación de la muestra de cada parámetro se encuentra en el Anexo 1.

Los análisis se realizaron en las instalaciones del Laboratorio de Ecotoxicología de la UDLA y en las instalaciones del Laboratorio BIOTEC. Para la cuantificación del mercurio se contrató los servicios del Laboratorio de Química Ambiental en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Central del Ecuador.

#### **2.1.2.1. Mercurio**

Para los análisis de mercurio las muestras se enviaron al Laboratorio de Química Ambiental en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Central del Ecuador, acreditación No. OAE LE 1C 04-002, LABORATORIO DE ENSAYOS. El método empleado para el análisis de mercurio en las muestras fue por espectrofotometría de absorción atómica de vapor frío APHA 3112.

#### **2.1.2.2. Potencial de Hidrogeno (pH)**

En la medición se utilizó el equipo Labbox PCTestr® 35 Multi-parameter que tiene una precisión de  $\pm 0.01$  pH y un rango de medida de -2 a 14 pH. Una vez calibrado el equipo, se procedió a sumergir el electrodo de pH a una profundidad aproximada de tres centímetros. Se esperó unos segundos a que el electrodo se estabilice y realice la lectura.

#### **2.1.2.3. Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ )**

Para el análisis de sulfatos se utilizó el test Nanocolor No. 0-87 que tiene un rango de medida de 200-1000 mg/L  $\text{SO}_4^{2-}$  y el test No. 0-86 que mide de 20 a 200 mg/L  $\text{SO}_4^{2-}$  en una longitud de onda de 436nm. Una vez preparada la muestra se procedió a realizar la medición utilizando el fotómetro Macherey-Nagel Nanocolor® PF-12. El método empleado fue la determinación fotométrica de enturbiamiento como sulfato de bario (Macherey-Nagel, 2011, p.58).

#### **2.1.2.4. Fosfatos (PO<sub>4</sub>)**

Para la medición de fosfatos se utilizó el test Nanocolor No. 0-80 que tiene un rango de medida de 0.30-15.00 mg/L P en una longitud de onda de 690nm. Una vez preparada la muestra se procedió a realizar la medición utilizando el fotómetro Macherey-Nagel Nanocolor® PF-12. El método empleado fue la determinación fotométrica como azul de molibdeno tras hidrólisis acida y oxidación a 100-120°C (Macherey-Nagel, 2011, p.73).

#### **2.1.2.5. Nitratos (NO<sub>3</sub>)**

Para el análisis de este parámetro se utilizó el test Nanocolor No. 0-64 que tiene un rango de medida de 0.30-22.00 mg/L NO<sub>3</sub>-N en una longitud de onda de 285 nm. Una vez preparada la muestra se procedió a realizar la medición utilizando el fotómetro Macherey-Nagel Nanocolor® PF-12. El método empleado fue la determinación fotométrica con 2,6-dimetilfenol, en una mezcla de ácido sulfúrico/ ácido fosfórico a una temperatura de 20-25°C (Macherey-Nagel, 2011, p.73).

### **2.2. Implementación del sistema de tratamiento**

#### **2.2.1. Selección de cepas de microalgas**

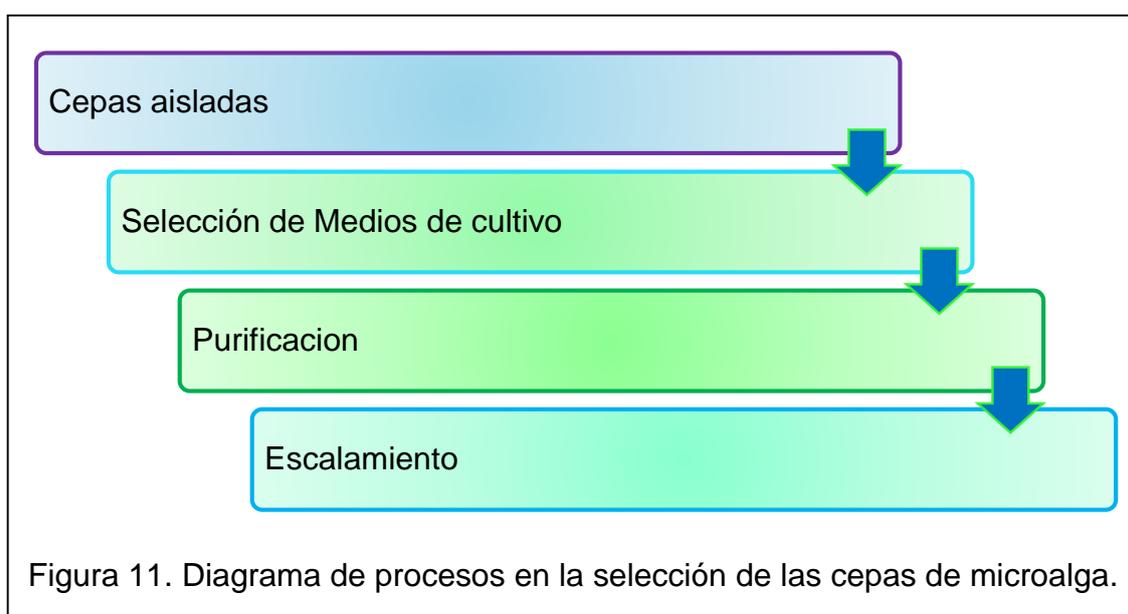
La investigación inició con nueve cepas de microalgas, las cuales fueron proporcionadas por el Laboratorio de Biotecnología Energética BIOTEC, con permiso de investigación No.002-14-IC-MC-DNB/MA otorgado por el Ministerio del Ambiente, con el cual se colectaron las muestras de microalgas de diferentes sistemas lacustres de áreas protegidas del Ecuador.

Las cepas de microalgas proporcionadas son parte de la Colección de Microalgas para Investigación del Ecuador (CMIE) del Laboratorio BIOTEC. La selección de cepas para los tratamientos del agua residual se realizó en base a los resultados obtenidos de la cinética de crecimiento en las etapas de cultivo y tratabilidad de mercurio.

Una vez seleccionadas las cepas de microalgas se procedió a la identificación de los géneros correspondientes, para lo cual se observaron los caracteres morfológicos que fueron comparados con claves taxonómicas (Bellinger W. y Sigee D. 2010; Oyadomari J. 2011).

### 2.2.1.1. Cultivo de las cepas de microalgas

A esta fase de la investigación se le denominó como “Etapa de cultivo”. Donde se usaron las nueve cepas de microalgas y el medio de cultivo correspondiente. A continuación en la figura 11 se describe el proceso de cultivo. Las cepas de microalgas empleadas fueron previamente aisladas por el personal del Laboratorio BIOTEC.



#### a) Selección del medio de cultivo

Se utilizaron tres diferentes medios de cultivo para el crecimiento de las cepas de microalgas, los cuales sirvieron como fuente de nutrientes. La elaboración de estos medios fue realizada en el Laboratorio BIOTEC, empleando distintos compuestos (Ver Anexo 2).

A continuación en la tabla 3 se especifica los medios de cultivo empleados en la investigación.

Tabla 3. Medios de cultivo empleados en el cultivo de microalgas.

Medio de cultivo	Abreviación
Bold Basal Medium (Bold 1949, Bischoff and Bold 1963)	<b>BB</b>
BG-11 Medium (RippKa <i>et al.</i> , 1979)	<b>BG-11</b>
Chu #10 Medium (Chu 1942)	<b>CHU</b>

En la tabla 4 se muestra las cepas de microalgas y los medios de cultivo correspondientes con la codificación de las cepas de microalgas empleada en la CMIE.

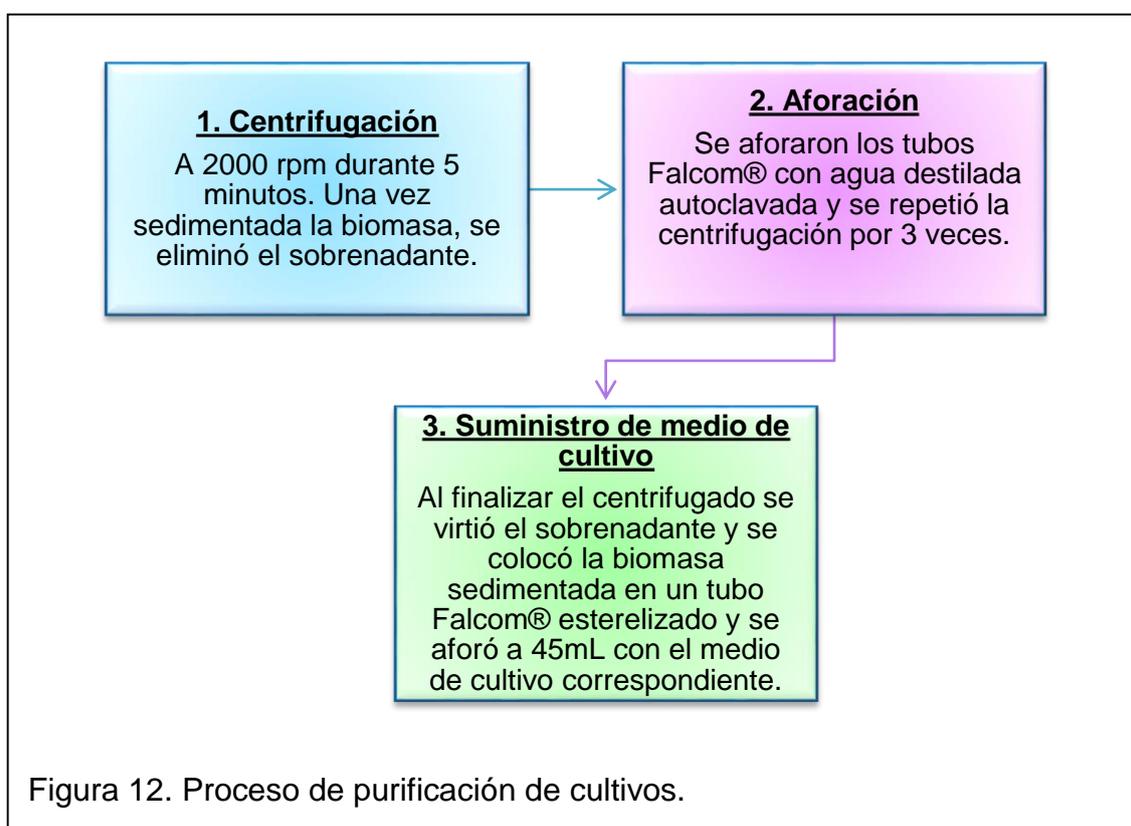
Tabla 4. Cepas de microalga, lugar de origen y medio de cultivo seleccionado.

Cepa de microalga	Lugar de origen	Laguna	Medio de cultivo
<b>H4-002</b>	Parque Nacional Sangay	Ozogoche	BB
			CHU
<b>D4-001</b>	Reserva Ecológica Cayambe-Coca	Sucus	BG-11
			BB
<b>B1-001</b>	Reserva Ecológica Antisana	Muertepungo	BB
			CHU
<b>BH2-001</b>	Parque Nacional Sangay	Kuyuc	BG-11
			BB
<b>CR-002</b>	Consorcio microalgas BIOTEC	N/A	BB
			BG-11
<b>D5-001</b>	Reserva Ecológica Cayambe-Coca	La virgen	BB
			BG-11
<b>I8.1-001</b>	Parque Nacional Llanganates	Rodeococha	BB
<b>Nostoc sp.</b>	Donación Ing. Edmundo Recalde (PUCE sede Ibarra)	N/A	BG-11
<b>C1</b>	Consorcio microalgas BIOTEC	N/A	BB

Las cepas de microalgas que se cultivaron en más de un medio de cultivo fueron sometidas a análisis de colorimetría y placas en el microscopio óptico para seleccionar únicamente el medio con mejores resultados y proceder al escalamiento y conteo celular.

### b) Purificación de cepas de microalgas

La purificación de los cultivos de microalgas se realizó mediante centrifugación para la eliminación de bacterias del medio, debido a la diferencia de peso las bacterias quedaron suspendidas y separadas de las microalgas que sedimentaron. Se empleó el equipo Boeco® C-28A., en la figura 12 se describe el proceso.



### c) Escalamiento

Para la producción de biomasa microalgal fue necesario el cultivo en diferentes escalas. La investigación inició con un volumen de 25mL y finalizó en 5L. A continuación en la figura 13 se explica detalladamente el proceso.



La investigación inicio con 25mL de inóculo (10mL de la cepa de microalga y 15 mL de medio de cultivo) en tubos Falcom®.



Despues se utilizó envases de 500mL donde se cultivó 250mL de inóculo de microalgas. En esta etapa del escalamiento inició la aplicación de CO<sub>2</sub>,3 veces por semana. El CO<sub>2</sub> sirvió como fuente nutricional para el crecimiento de las microalgas. El tiempo de cultivo fue de 25 días.



Posteriormente, se usó envases de 1L, donde el inóculo ocupó 750 mL. Continuó la aplicación de CO<sub>2</sub>,3 veces por semana. En esta etapa del escalamiento se realizó el conteo celular. El tiempo de cultivo fue de 30 días.



Finalmente, se empleó envases de 5L, donde el inóculo ocupó 4L. Se reemplazó el medio de cultivo por agua destilada y se empleó Nitrofoska® foliar como nutriente para el crecimiento de las microalgas.

Figura 13. Proceso para el escalamiento en la producción de microalgas.

Fue necesario realizar un conteo celular empleando la cámara de Neubauer marca Marienfeld®, previo al escalamiento, para determinar la población microalgal. A través de la ecuación 1 se determinó la cantidad de inóculo necesaria para iniciar el crecimiento de las microalgas en un periodo de tiempo determinado con una población inicial de  $1 \times 10^6$  UFC. En todos los escalamientos se partió de esta población.

$$V_{de\ biomasa} = \frac{Volumen\ final\ escalamiento * 10^6}{Número\ de\ células\ promedio * 10^4 * Número\ de\ diluciones} \quad (Ecuación\ 1)$$

Durante el cultivo de las microalgas las condiciones físicas se mantuvieron constantes, en la tabla 5 se las determina.

Tabla 5. Condiciones físicas en la etapa de cultivo de microalgas.

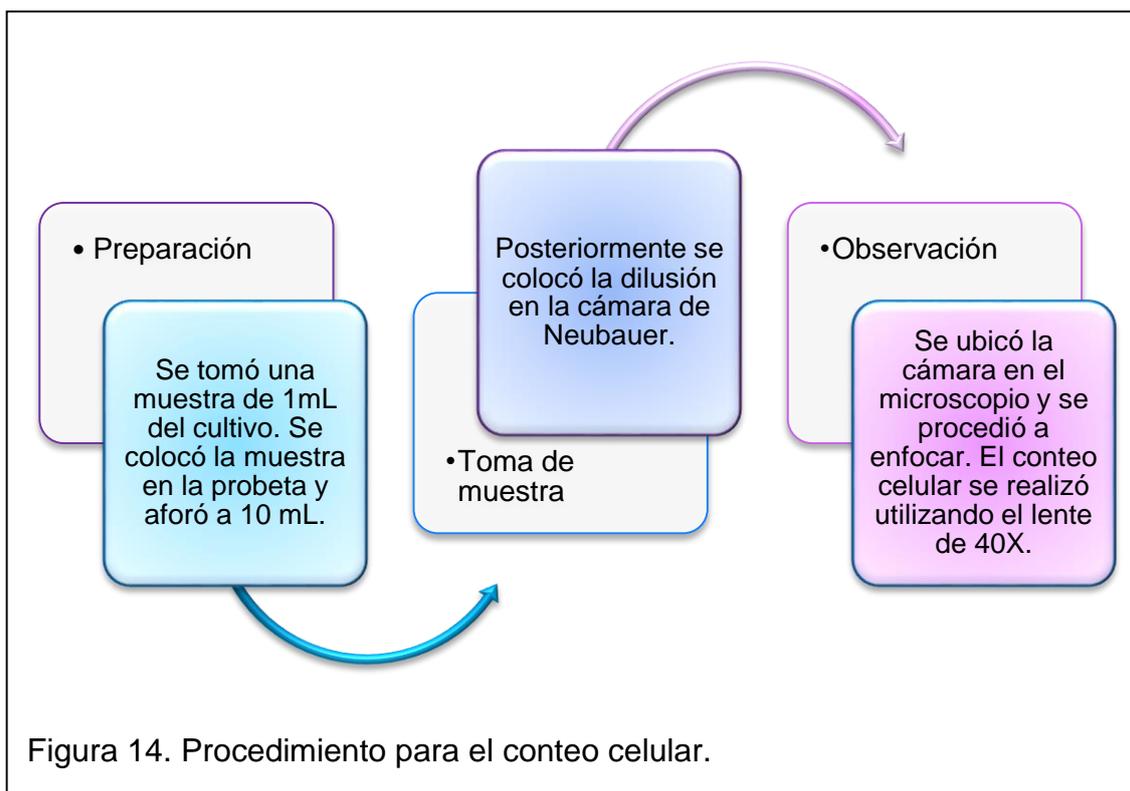
Parámetro	Condición
Luz	1500 luxes
Temperatura	Del inoculo: Exterior: 13-25 °C
pH	7
CO <sub>2</sub>	5 bar durante 5 minutos; 3 veces por semana
Medio de cultivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bold Basal Medium (Bold 1949, Bischoff and Bold 1963)</li> <li>- BG-11 Medium (RippKa et al., 1979)</li> <li>- Chu #10 Medium (Chu 1942)</li> </ul>
Aireación	Constante
Geomembrana	No
Tiempo de retención	30 días

### 2.2.1.2. Cinética de crecimiento

La cinética de crecimiento de cada cepa de microalga se obtuvo a través de conteos celulares realizados durante el tiempo de retención de cada etapa de la investigación. El conteo celular se lo realizó utilizando la cámara de Neubauer marca Marienfeld® y para la observación se utilizó el microscopio óptico marca Sogeresa®. Los datos recopilados sirvieron para la elaboración de las curvas de crecimiento y así se determinó que cepa de microalga tuvo mayor producción de biomasa.

En el caso del consorcio se realizó el conteo celular de cada género que lo conformó para determinar el dominante. La identificación de los géneros se basó en la morfología de las microalgas.

En la figura 14 se explica cómo se realizó el proceso de conteo celular.



Con los resultados del conteo celular de cada etapa de la investigación se calculó la tasa de crecimiento celular mediante la ecuación de Prescott *et al.* (2004) descrita a continuación.

$$\mu = \frac{(\log N_t - \log N_0)}{0.310 * t} \quad (\text{Ecuación 2})$$

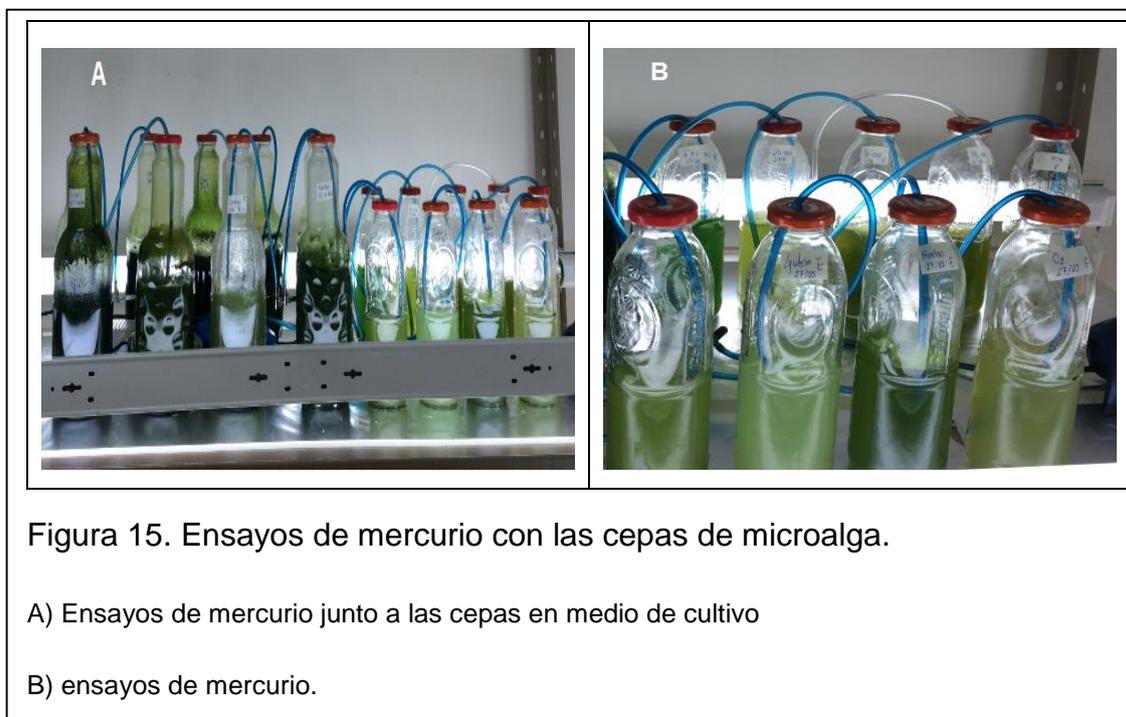
En donde:  $\mu$  es tasa de crecimiento;  $\log N_t$  es el logaritmo en base 10 de la densidad celular en un tiempo "t" (cél. mL<sup>-1</sup>);  $\log N_0$  es el logaritmo en base 10 de la densidad celular inicial (cél. mL<sup>-1</sup>) y "t" es el tiempo en días.

### 2.2.1.3. Ensayo de tratabilidad de mercurio

A esta fase de la investigación se le denominó "Etapa de tratabilidad" donde se realizó el ensayo de adaptación del mercurio con las nueve cepas de microalgas, usando el agua residual colectada como medio de cultivo.

Para determinar la capacidad de adaptación y crecimiento se realizaron placas con observación al microscopio óptico verificando que las microalgas estuvieran

vivas, además de conteo celular durante el tiempo de retención. En la figura 15 se muestra el ensayo realizado.



Durante la etapa de tratabilidad las condiciones físicas se mantuvieron constantes, en la tabla 6 se las determina.

Tabla 6. Condiciones físicas en la etapa de tratabilidad de mercurio.

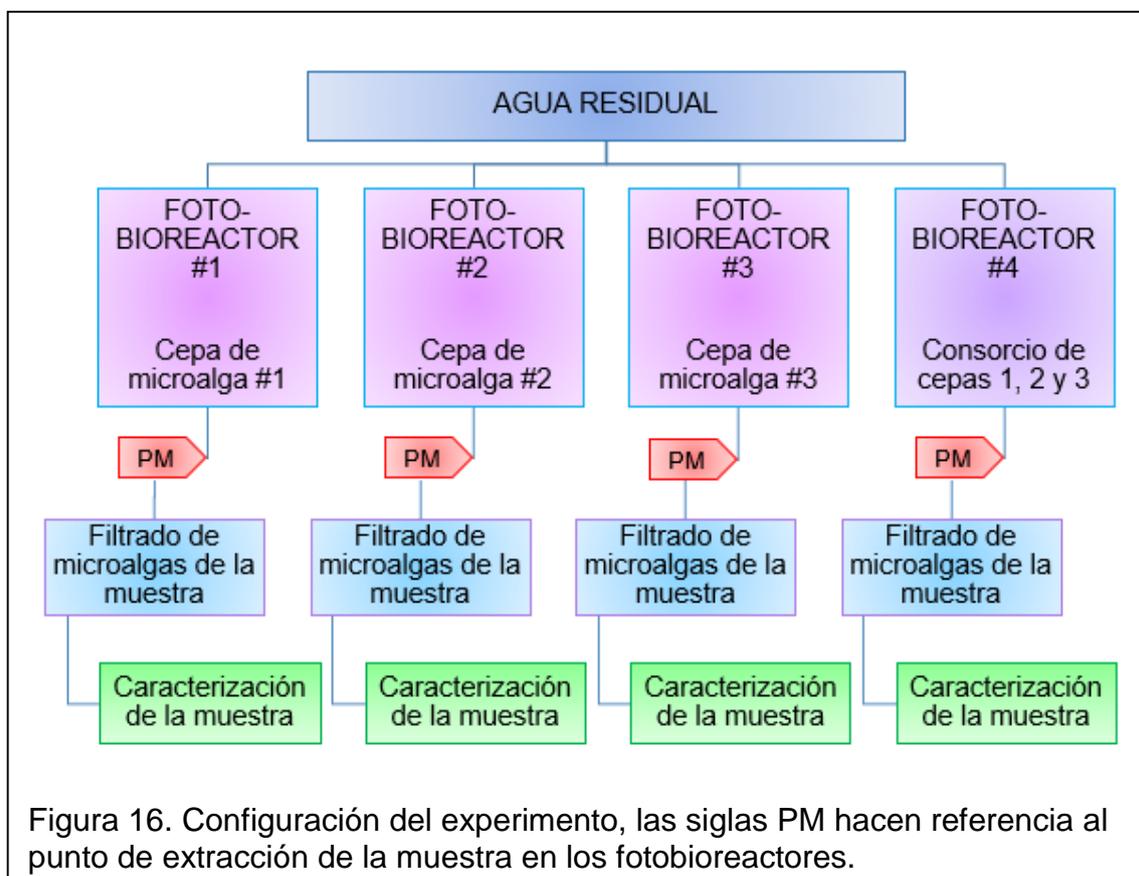
Parámetro	Condición
Luz	1500 luxes
Temperatura	Del inculo: 29.5 °C Exterior: 13-25 °C
pH inicial	6.8
CO <sub>2</sub>	5 bar durante 5 minutos, 3 veces por semana.
Medio de cultivo	Agua residual colectada
Aireación	Constante
Geomembrana	No
Tiempo de retención	15 días

## 2.2.2. Tratamiento del agua residual

Se denominó “Etapa de tratamiento del agua residual” a esta fase de la investigación, donde se cultivaron las cepas de microalgas seleccionadas en los fotobiorreactores usando el agua residual como medio de cultivo para la remoción de contaminantes. Se obtuvo la información de los parámetros de interés así como de la cinética de crecimiento de las microalgas.

### 2.2.2.1. Ensamblaje de los fotobiorreactores

En la etapa de tratamiento del agua residual se ensamblaron los cuatro fotobiorreactores a escala laboratorio, tres de los cuales contenían cepas distintas de microalgas y el cuarto contenía un consorcio conformado por las tres cepas seleccionadas. Se determinó la eficiencia de remoción de manera individual y conjunta de los géneros de microalgas utilizados en el tratamiento. A continuación en la figura 16 se muestra la configuración del experimento.



Los datos obtenidos del conteo celular de cada género de microalga determinaron los tiempos de la fase de latencia, exponencial, estacionaria y muerte del crecimiento celular.

#### **2.2.2.2. Descripción de los fotobioreactores**

Los fotobioreactores se colocaron en forma paralela para evaluar cada tratamiento individualmente. El agua residual colectada fue vertida manualmente, cinco litros en cada reactor.

Cada fotobioreactor contaba con un sistema de iluminación propio, un motor de aireación de 112V marca Heto SK-9102 que funcionaba las 24 horas del día, así como una bomba Circulator Plus 2-12 para tanques de 1 a 10 galones que recirculaba el agua dentro del reactor, simulando una cascada; el agua ascendía y era distribuida a lo largo de una manguera plástica de  $\frac{1}{4}$  de pulgada donde se hicieron varios orificios, los cuales direccionaban el agua a la geomembrana.

A continuación en la Figura 17 se muestran los fotobioreactores.

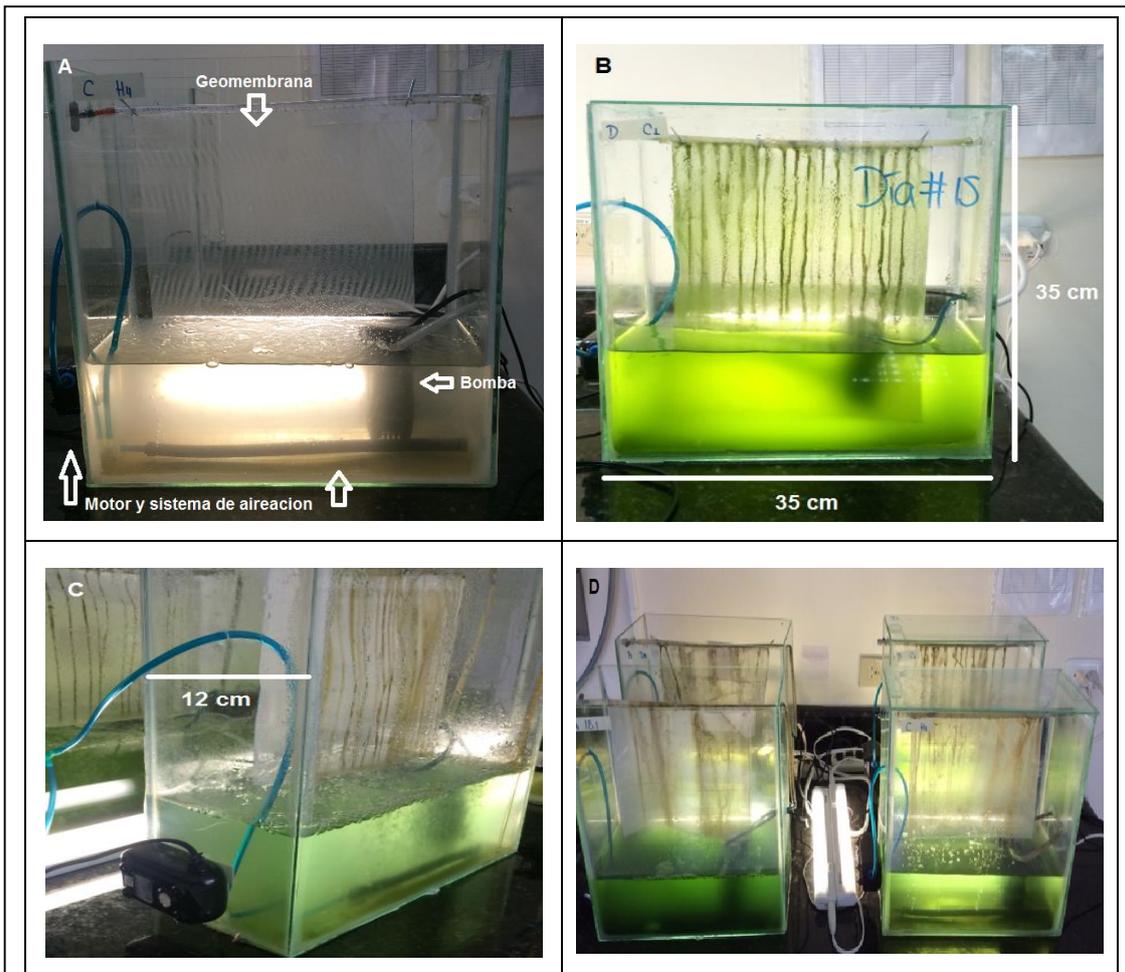


Figura 17. Fotobioreactores utilizados para la etapa de tratamiento del agua residual.

- A) elementos del fotobioreactor
- B) dimensiones frontales
- C) dimensiones laterales
- D) fotobioreactores ensamblados.

### 2.2.2.3. Condiciones de funcionamiento

Las condiciones de funcionamiento de los fotobioreactores se mantuvieron constantes a lo largo de la investigación. No se utilizaron nutrientes como nitrógeno, fósforo y azufre para evitar alterar los resultados en la caracterización final del agua tratada en los parámetros de nitratos, fosfatos y sulfatos. En la tabla 7 se estipulan las condiciones de funcionamiento.

Tabla 7. Condiciones físicas presentes en la etapa de tratamiento del agua residual en los fotobioreactores.

<b>Parámetro</b>	<b>Condición</b>
<b>Luz</b>	1500 luxes
<b>Temperatura</b>	Del inóculo: 28.5 °C Exterior: 13-25 °C
<b>pH inicial</b>	6.9
<b>CO<sub>2</sub></b>	5 bar durante 10 minutos al día; 5 veces por semana
<b>Medio de cultivo</b>	Agua residual colectada
<b>Aireación</b>	Constante
<b>Geomembrana</b>	Si
<b>Tiempo de retención</b>	20 días

### 2.3. Eficiencia de los tratamientos

#### 2.3.1. Diseño experimental

Para el análisis estadístico se empleó un diseño completamente aleatorio (DCA), mismo que es utilizado para la comparación de dos o más tratamientos considerando únicamente dos fuentes de variabilidad: los tratamientos y el error aleatorio (Gutiérrez y De la Vara, 2013, p.52). A través del diseño propuesto se analizaron las variables investigadas: remoción de mercurio, sulfatos, fosfatos y nitratos, además de acidificación del agua en cada tratamiento, para lo cual en la tabla 8 se presenta la matriz del DCA.

Tabla 8. Matriz de factor y niveles para la biorremediación a escala laboratorio.

			<b>Factor</b>
<b>Tiempo de retención en días</b>	<b>Réplica</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Cepa de microalga</b>
20	R1	1	Cepa 1
20	R2	1	Cepa 1
20	R3	1	Cepa 1
20	R1	2	Cepa 2
20	R2	2	Cepa 2
20	R3	2	Cepa 2
20	R1	3	Cepa 3
20	R2	3	Cepa 3
20	R3	3	Cepa 3
20	R1	4	Consortio
20	R2	4	Consortio
20	R3	4	Consortio

Además de, tablas, figuras, ecuaciones y software de análisis estadístico como IBM SPSS Statistics Base 23 y Microsoft Excel se comparó los tratamientos planteados, para lo cual se utilizaron los siguientes análisis estadísticos:

- Análisis de varianza ANOVA

Se empleó una prueba de análisis de varianza ANOVA, la cual determinó si la hipótesis nula era aceptada o rechazada, verificando si existió alguna diferencia estadística entre los efluentes tratados con microalgas en los distintos parámetros evaluados.

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

$$H_i = \mu_i \neq 0 \text{ para algún } i = 1, 2, 3, 4$$

Los valores de significancia fueron:

Sig.=  $p > 0.005$ ; no hay significancia

Sig.=  $p \leq 0.05$ ; existe una diferencia significativa

Sig.=  $p \leq 0.01$ ; existe una diferencia altamente significativa

- Prueba de Levene

La prueba de Levene evaluó la igualdad de varianzas de una variable para dos o más grupos, para corroborar el aceptar o rechazar la hipótesis nula.

- Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

El Test HSD (Honestly-significant-difference) de Tukey es una comparación entre las medias de los niveles de un factor. Se lo realizó después de haber rechazado la Hipótesis nula de igualdad de medias, al interpretar los resultados obtenidos en el ANOVA. A través de este test se especificó la Hipótesis alternativa (Porrás, 2000, pp. 47-49).

- Análisis descriptivo

El objetivo de realizar este análisis fue la de agrupar y representar la información recopilada de forma organizada, de tal manera fue posible identificar el comportamiento y aspectos característicos de los datos (Flores, 2009, pp. 2-5).

### **2.3.2. Cinética de crecimiento en los fotobioreactores**

Para la determinar de la cinética de crecimiento de los géneros de microalgas utilizados se procedió a realizar el conteo celular durante el tiempo de retención. Al recopilar los datos obtenidos se determinó que género de microalga tuvo una tasa de crecimiento mayor. La población inicial de microalgas fue de  $1 \times 10^6$  UFC, en el caso del consorcio se calculó en partes iguales la concentración requerida de cada género para completar la población inicial.

### 2.3.3. Remoción de mercurio

Para determinar el tiempo de remoción requerido por cada género de microalga se midió la absorbancia del mercurio, para lo cual se elaboraron soluciones de agua desmineralizada y mercurio a distintas concentraciones.

Para la medición de cada muestra se empleó el fotómetro Macherey-Nagel NANOCOLOR® D500 a una longitud de onda de 253.7 nm. En la tabla 9 se muestran los valores de absorbancia para cada concentración.

Tabla 9. Absorbancia del mercurio.

<b>Concentración elaborada (mg/L)</b>	<b>Absorbancia</b>
<b>0.007</b>	0.087
<b>0.006</b>	0.073
<b>0.005</b>	0.065
<b>0.004</b>	0.054
<b>0.003</b>	0.040
<b>0.002</b>	0.027
<b>0.001</b>	0.016

Posteriormente, se compararon los valores referenciales obtenidos de la tabla 9 con los resultados de las mediciones diarias de muestras extraídas de los fotobioreactores, las cuales fueron previamente filtradas con mallas de fibra de vidrio. Esto permitió identificar la disminución del mercurio en función de los días en el proceso de biosorción con las microalgas.

### 3. CAPÍTULO III: RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la figura 18 se muestra un breve resumen de los puntos a ser tratados en este capítulo.

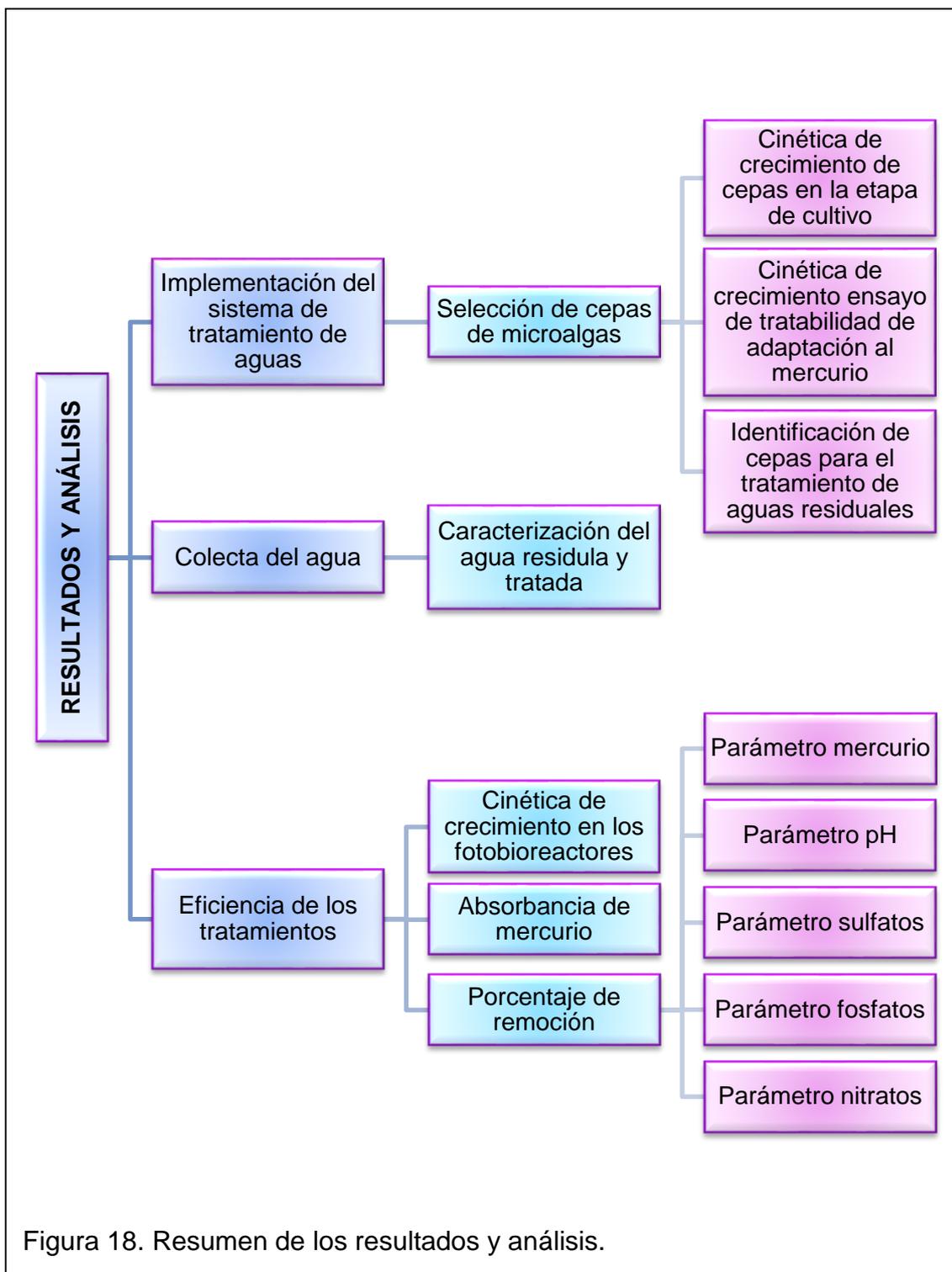


Figura 18. Resumen de los resultados y análisis.

### 3.1. Implementación del sistema de tratamiento de aguas

#### 3.1.1. Selección de cepa de microalga

Las curvas cinéticas de crecimiento se obtuvieron a partir del conteo celular llevado a cabo durante cada etapa de la investigación.

##### 3.1.1.1. Cinética de crecimiento de las cepas de microalga en la etapa de cultivo

En la tabla 10 se detalla en forma descendente el crecimiento alcanzado por cada cepa de microalga y el medio de cultivo utilizado.

Tabla 10. Resultado final del conteo celular en la etapa de cultivo.

Puesto	Cepa de microalga	Densidad celular final (UFC)	Medio de cultivo	Tasa de crecimiento celular
1	I8.1-002	5.28E+07	Bold Basal	0.88
2	D4-001	4.92E+07	Bold Basal	0.86
3	H4-002	4.80E+07	Bold Basal	0.82
4	CR-002	4.49E+07	BG-11	0.79
5	C1	4.31E+07	Bold Basal	0.73
6	B1-001	4.08E+07	Bold Basal	0.72
7	D5-001	4.05E+07	Bold Basal	0.7
8	BH2-001	3.55E+07	BG-11	0.65
9	<i>Nosctoc</i> sp	3.49E+07	BG-11	0.59

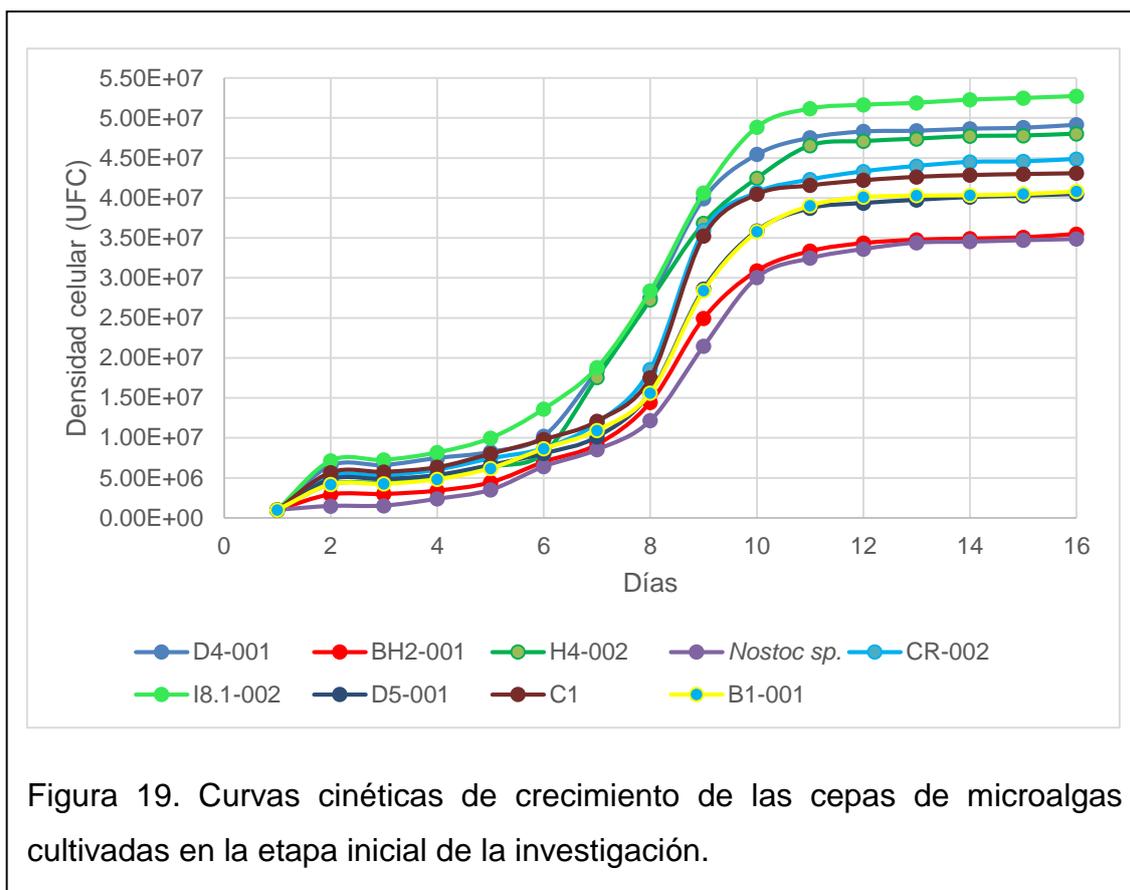
En forma general las cepas que crecieron en medio de cultivo Bold Basal alcanzaron una mayor densidad celular que las que fueron cultivadas en medio BG-11, lo cual coincide con la investigación de Campos, González y Vázquez (2013, pp. 13-15) donde obtuvieron un mayor crecimiento de biomasa

empleando este medio, principalmente debido a la cantidad de macro y micro nutrientes que posee el medio de cultivo Bold Basal.

Los datos recopilados durante la etapa de cultivo demuestran que existió un crecimiento considerable en cada una de las cepas de microalgas debido a que su reproducción es por división celular de tipo binaria permitiendo alcanzar una alta tasa de crecimiento. Según Torrentera y Tacón (1999, pp. 32-40) factores determinantes como la aireación permiten la homogenización de nutrientes y una agitación constante evitando la sedimentación y por ende retrasos en el crecimiento de las microalgas. Además, de la cantidad de luz disponible, temperatura del cultivo, diseño de los recipientes y medio de cultivo empleado influenciaron de manera directa en la producción de biomasa de las cepas de microalga cultivadas. La implementación correcta de técnicas de purificación, aislamiento y mantenimiento de cepas garantizaron las condiciones requeridas por el cultivo, así como la aplicación de CO<sub>2</sub> y suministro de los medios de cultivo como suplemento nutricional que mejoraron e incrementaron la capacidad de crecimiento en las cepas empleadas. Los medios de cultivo coinciden en una fuente principal de nitrógeno, fósforo, potasio y vitaminas que al ser proporcionados en la cantidad adecuada contribuyen al desarrollo de un cultivo sano (Romo, 2009, pp. 3-7).

Los resultados de la tasa de crecimiento de cada cepa durante la fase exponencial de los cultivos demuestran que las microalgas que crecieron en medio Bold Basal presentan valores similares entre sí, lo que según Campos, González y Vázquez (2013, pp. 16-19) se debe a la capacidad de asimilación de nutrientes de dichas cepas. La tasa de crecimiento celular permite conocer el día en que el cultivo alcanza la mayor densidad celular significativa, para la etapa de cultivo se determinó ese tiempo en 20 días lo cual concuerda con lo manifestado por Guillard y Sieracki (2005, pp. 243-250) donde en un estudio similar determina que un cultivo joven bajo condiciones óptimas de crecimiento alcanza su fase estacionaria a los 22 días de crecimiento.

A continuación en la figura 19 se detallan las curvas cinéticas de crecimiento en cada cepa de microalga.



La cinética de crecimiento se obtuvo de cada cepa cultivada en un volumen de 5 litros, basándose en los resultados se determinó que el crecimiento de las cepas fue exponencial y los tiempos requeridos fueron:

- Fase de latencia: del día 1 hasta el día 6.
- Fase de crecimiento exponencial: del día 6 al día 24
- Fase estacionaria: del día 24 al día 30

Debido a la inoculación en medios de cultivo no limitantes y condiciones físicas adecuadas no existió decrecimiento. El suministro constante de medio de cultivo y la aplicación de CO<sub>2</sub> mantuvo el crecimiento estable (Hirata *et al.* 2005, pp. 75-79).

### 3.1.1.2. Cinética de crecimiento en la etapa de tratabilidad de adaptación al mercurio

Las curvas cinéticas de crecimiento se obtuvieron a partir del conteo celular llevado a cabo durante los ensayos de tratabilidad de adaptación al mercurio con cada cepa de microalga. A continuación en la tabla 11 se los resume y determina la tasa de crecimiento celular y la diferencia entre las etapas 1 y 2.

Tabla 11. Datos finales de la densidad celular en la etapa de tratabilidad de adaptación al mercurio.

Puesto	Cepas de microalga	Densidad celular final (UFC)	Tasa de crecimiento celular	Diferencia entre la etapa de cultivo y la etapa de tratabilidad (%)
1	I8.1-002	1.78E+07	0.70	5.32
2	D4-001	1.59E+07	0.66	13.37
3	H4-002	1.58E+07	0.61	10.51
4	D5-001	8.41E+06	0.57	16.71
5	C1	8.31E+06	0.56	31.32
6	BH2-001	7.88E+06	0.51	14.22
7	B1-001	6.50E+06	0.44	40.96
8	CR-002	5.88E+06	0.38	50.63
9	<i>Nostoc</i> sp.	3.93E+06	0.31	53.99

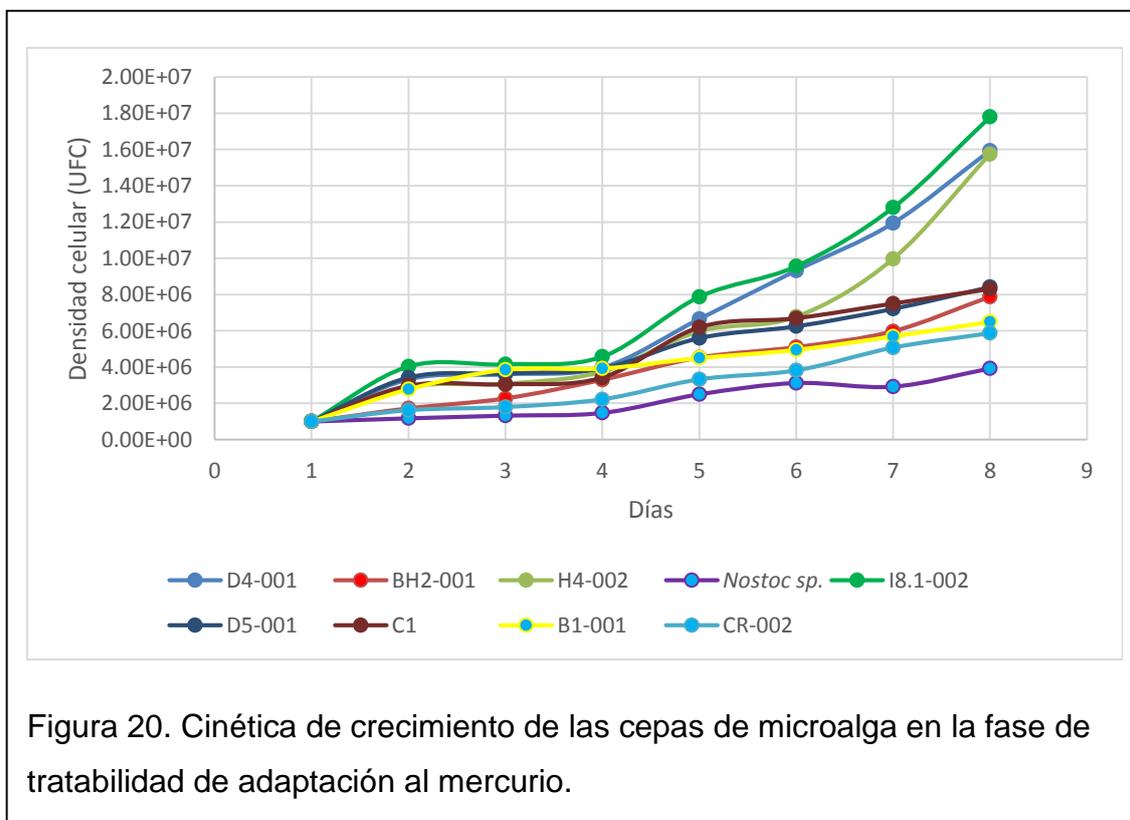
Nota explicativa: la diferencia mencionada corresponde a la comparación de los resultados finales obtenidos del conteo celular en la etapa de cultivo y la etapa de ensayos de tratabilidad de adaptación al mercurio, para determinar que incidencia tuvo el agua residual como medio de cultivo en el crecimiento celular.

Al comparar los resultados obtenidos en la etapa de tratabilidad de adaptación al mercurio con los resultados del día 15 de la etapa de cultivo se determinó que el crecimiento de las cepas de microalga fue menor durante el ensayo de adaptación al mercurio, debido a la toxicidad del agua por la presencia de varios metales y sustancias químicas, sin embargo las microalgas aprovecharon el

fósforo, nitrógeno, potasio y azufre del agua como fuente de nutrientes para el crecimiento (Ramos y Bertucco, 2012, pp. 2-4).

En la tabla 13 se observa la diferencia en porcentajes de la densidad celular alcanzada entre las dos etapas, las cepas cuya diferencia fue menor es por la capacidad de los géneros de microalga para adaptarse a la presencia de metales pesados, según León y Chaves (2010, pp. 158-163) las cepas que alcanzaron mayor densidad celular tienen una capacidad distinta de aprovechar los nutrientes del agua contaminada y fijar los metales en su membrana celular sin afectar su crecimiento. Sin embargo, Guevara y Zaldumbide (2010, pp. 55-66) afirma en su investigación que las cepas de microalgas que no crecieron en el agua residual no necesariamente carecen de la capacidad de fijar metales ya que la biomasa muerta también los adsorbe, obteniendo porcentajes de remoción de hasta el 99%, dependiendo de la concentración.

A continuación se muestra en la figura 20 se muestran las curvas cinéticas de crecimiento de cada cepa en la fase de tratabilidad de adaptación al mercurio.



De manera general se observa que las microalgas requieren de un tiempo de adaptación mayor, lo que es normal según Arnold (2013, pp. 12-18) ya que los microorganismos tienden a retrasar su crecimiento hasta asimilar por completo el medio de cultivo, causando una disminución en la producción de biomasa.

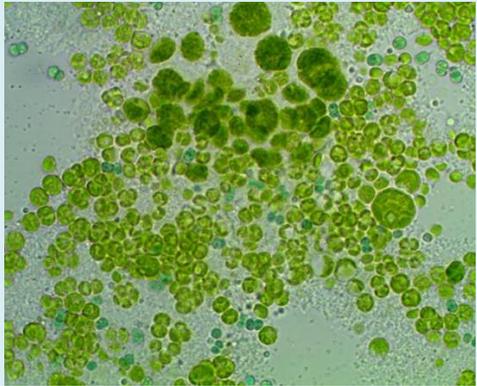
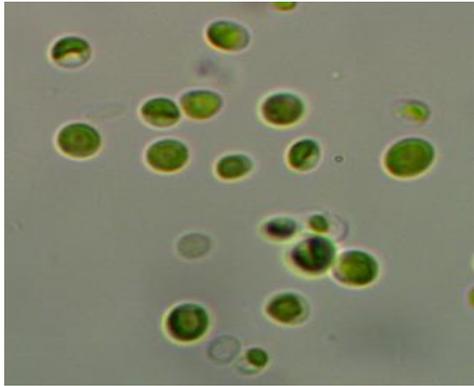
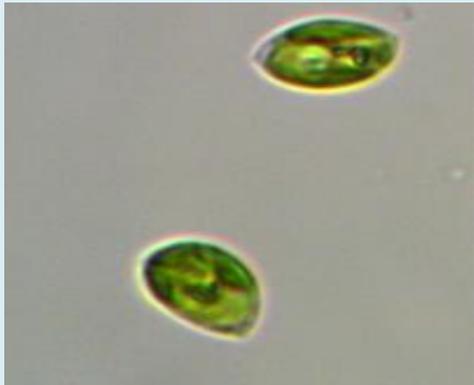
Basándose en los resultados obtenidos se determinó que el crecimiento de las cepas fue exponencial y los tiempos requeridos fueron:

- Fase de latencia: del día 1 hasta el día 6.
- Fase de crecimiento exponencial: del día 6 al día 14.
- Fase estacionaria: a partir del día 14 al día 16.
- Fase de muerte: a excepción de las cepas I8.1-002, D4-001 y H4-002 las cepas restantes decrecieron a partir del día 15.

### **3.1.1.3. Identificación de cepas para el tratamiento de aguas residuales**

En la fase de tratabilidad de adaptación al mercurio se seleccionó las cepas que alcanzaron la mayor densidad celular, demostrando una mejor capacidad de adaptación al agua residual. Se procedió a su identificación. A continuación en la tabla 12 se muestran las cepas seleccionadas.

Tabla 12. Identificación de las cepas de microalga utilizadas en los tratamientos.

Cepa de microalga	Género de microalga	Fotografía
I8.1-002	<i>Pleurococcus</i> sp.	
D4-001	<i>Chlorella</i> sp.	
H4-002	<i>Scenedesmus</i> sp.	

Adicionalmente, en la tabla 13 se identifican el resto de cepas de microalgas empleadas en las etapas de cultivo y de tratabilidad de adaptación al mercurio.

Tabla 13. Identificación de cepas de microalgas no seleccionadas.

Cepa de microalga	Género de microalga
H2-001	<i>Chlorococcum</i> sp.
CR-002	<i>Chlorella</i> sp. + <i>Selenastrum</i> sp..
D5-001	<i>Chlorella</i> sp.
C1	<i>Chlorella</i> sp. + <i>Scenedesmus</i> sp.
B1-001	<i>Chlorella</i> sp.
<i>Nostoc</i> sp.	<i>Nostoc</i> sp.

### 3.2. Caracterización del agua residual antes y después del tratamiento

Los resultados de los análisis de mercurio se encuentran en el Anexo 3. A continuación en la tabla 14 se muestra la caracterización del agua antes y después de los tratamientos indicando el género de microalga empleado.

Tabla 14. Caracterización del agua colectada y tratada.

Microalga sp	Réplica	Mercurio (mg/L)		pH		Sulfatos (mg/L)		Fosfatos (mg/L)		Nitratos (mg/L)	
		inicial	final	inicial	final	inicial	final	inicial	final	inicial	Final
<i>Pleurococcus</i> sp.	1	0.007	0.00103	6.8	5.5	1360	455.00	13.80	0.02	44	5.78
	2	0.007	0.00095	7.0	5.4	1360	468.78	13.80	2.75	44	4.23
	3	0.007	0.00103	6.8	5.8	1360	437.63	13.80	1.62	44	3.21
<i>Chlorella</i> sp.	1	0.007	0.00137	7.2	5.8	1360	328.75	13.80	1.00	44	5.77
	2	0.007	0.00103	7.3	5.2	1360	300.01	13.80	2.78	44	4.58
	3	0.007	0.00120	6.7	5.1	1360	322.65	13.80	2.65	44	8.62
<i>Scenedesmus</i> sp.	1	0.007	0.00231	7.1	5.8	1360	563.45	13.80	3.90	44	8.70
	2	0.007	0.00265	6.8	5.2	1360	512.60	13.80	2.01	44	6.45
	3	0.007	0.00239	6.9	5.5	1360	533.00	13.80	2.20	44	6.23
Consorcio	1	0.007	0.00129	7.4	5.8	1360	312.00	13.80	0.02	44	2.35
	2	0.007	0.00129	6.9	5.9	1360	328.70	13.80	1.00	44	3.98
	3	0.007	0.00137	6.8	5.5	1360	344.50	13.80	0.18	44	2.55

La contaminación del río Calera, cuyo cauce es receptor de todos los efluentes generados en las plantas de beneficio, se da principalmente por flujos ácidos vertidos. Los flujos ácidos son aguas contaminadas con altos índices de acidez y carga de metales pesados, que son generados en las plantas de beneficio por lixiviación de metales asociados al procesamiento del oro y a la oxidación de minerales sulfurados (Pineda, 2010, pp. 43-45).

Al comparar los valores iniciales obtenidos en la tabla 14 con los valores determinados en el TULSMA, libro VI, Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso agua, Tabla 12. "Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce" (ver Anexo 4). Se observa que las concentraciones de los parámetros analizados en la investigación no cumplen con la normativa legal vigente.

La concentración inicial de mercurio corresponde a 0.007 mg/L, según el TULSMA el límite máximo permisible no debe superar la concentración de 0.005 mg/L, incumpliendo la normativa legal.

En cuanto al parámetro de pH, los valores iniciales obtenidos oscilan entre 6.9 y 7.4, los valores estipulados en el TULSMA indican que el rango para descargas es de 5 a 9; cumpliendo con la normativa legal.

Para los nutrientes azufre, fósforo y nitrógeno los resultados de la caracterización inicial fueron: 1360 mg/L de sulfatos, 13.80 mg/L de fosfatos y 44 de nitratos mg/L correspondientemente. El TULSMA determina los valores máximos permisibles en: 1000 mg/L de sulfatos, 10 mg/L de fosfatos y 10 mg/L de nitratos. Los resultados obtenidos demuestran que el agua no cumple con la normativa legal.

### **3.3. Eficiencia de los tratamientos**

#### **3.3.1. Cinética de crecimiento en los fotobioreactores**

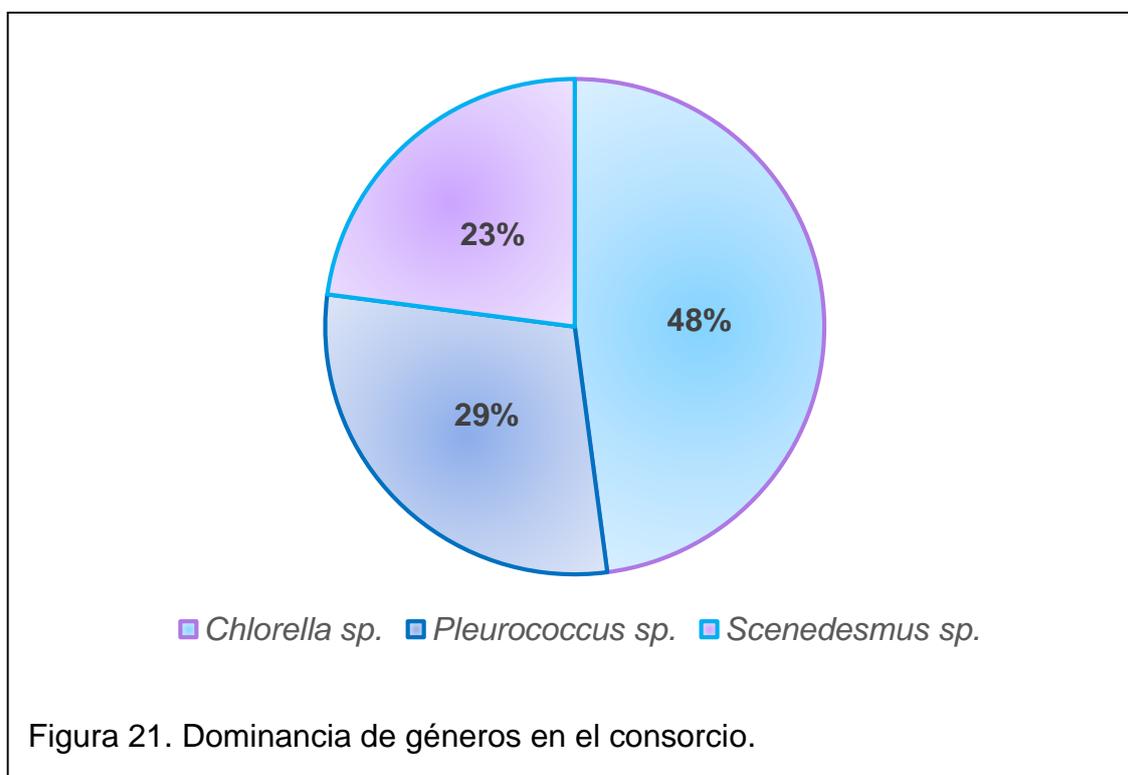
Las curvas cinéticas de crecimiento se obtuvieron del conteo celular llevado a cabo durante la etapa de tratamiento del agua residual en los fotobioreactores con las cepas de microalgas seleccionadas. A continuación en la tabla 15 se lo resume y determina la tasa de crecimiento celular.

Tabla 15. Datos finales de la densidad celular en la etapa de tratamiento del agua residual en los fotobioreactores.

Puesto	Género de microalga	Densidad celular final (UFC)	Tasa de crecimiento celular
1	Consorcio	6.28E+07	0.94
2	<i>Scenedesmus</i> sp.	5.79E+07	0.92
3	<i>Chlorella</i> sp.	5.44E+07	0.90
4	<i>Pleurococcus</i> sp.	4.93E+07	0.88

El género *Pleurococcus* sp. fue el que menor en densidad celular obtuvo, debido a la capacidad que tiene este género en fijarse y formar una biopelícula en la geomembrana colocada en los fotobioreactores. El género *Scenedesmus* sp. no se fijó a la geomembrana y por ende no se formó la biopelícula, concentrando todas las microalgas en el agua residual.

El consorcio de microalgas fue el que mayor densidad celular obtuvo, por lo que se determinó que género fue el dominante, en la figura 21 se muestran los resultados.



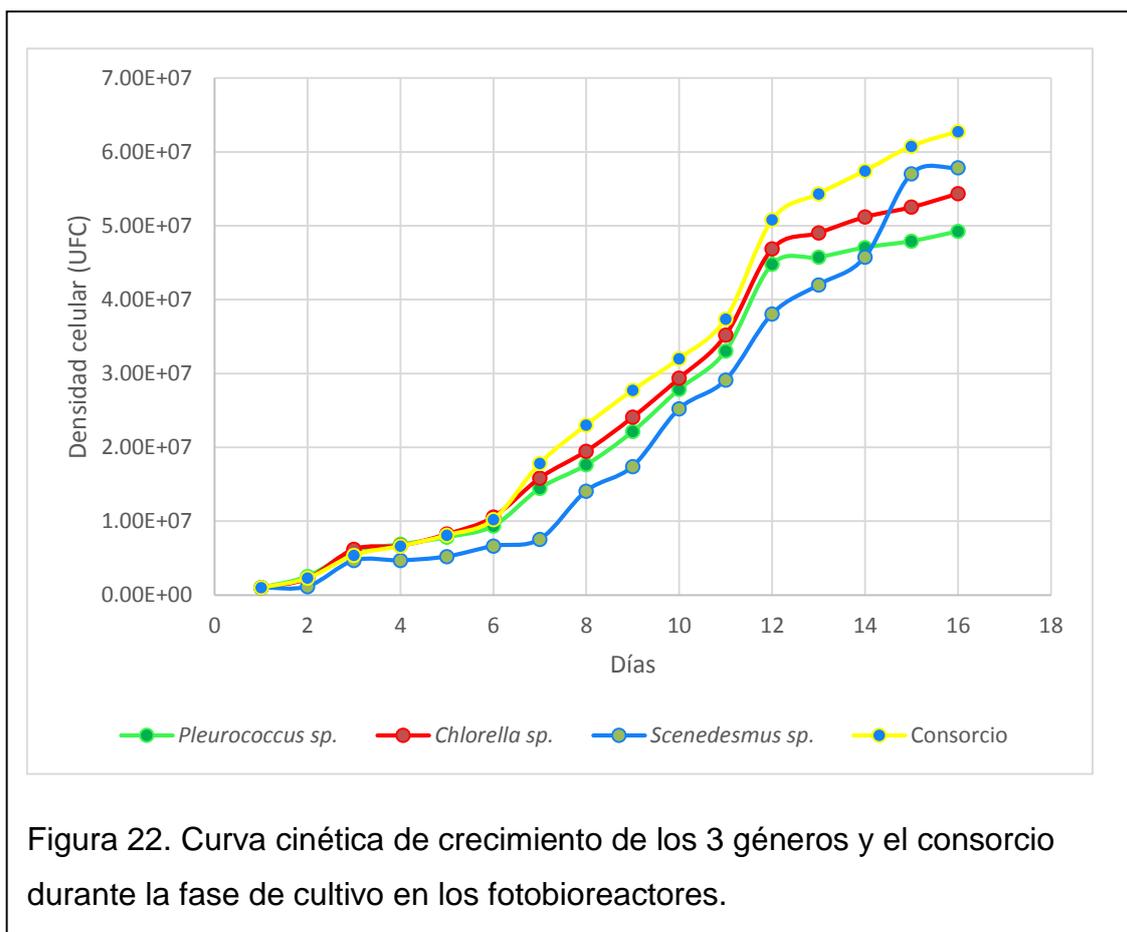
Los géneros empleados forman parte de la división Chlorophyta, según Escorihuela, Núñez, Rosales, Mora y Morales (2007, pp. 227-231) los géneros de microalgas de esta división tienden a asimilar y transformar los nutrientes presentes en el agua residual en biomasa de manera eficiente, a diferencia de otras divisiones del reino Protista. Salazar (2005, p. 44) lo corrobora afirmando que el crecimiento celular en aguas residuales tóxicas es posible si se controlan condiciones como la aireación que oxida la materia orgánica, la aplicación de CO<sub>2</sub> como una fuente variable de nutrientes y el aumento de pH para la precipitación de fósforo.

Al comparar los resultados de densidad celular en la etapa de tratamiento del agua residual en los fotobioreactores y la dominancia del consorcio se aprecia que el género *Scenedesmus* sp. pese a haber alcanzado una gran densidad celular cultivado de manera individual no iguala el resultado en el consorcio, esto se debe principalmente a que el género mencionado tardó más tiempo en adaptarse a las condiciones del medio de cultivo empleado, a diferencia de los géneros *Pleurococcus* sp. y *Chlorella* sp.

Chacón, Andrade y Cárdenas C (2004, pp. 91-93) manifiestan que esto se debe a que en un medio compartido (un consorcio) es importante que los géneros de microalgas tengan características similares en cuanto a la capacidad de adaptación, específicamente en la producción de metalotioninas ya que al estar en contacto con el agua contaminada con metales pesados deben adquirir resistencia. Al existir una demora es muy probable que los géneros que mejor se acoplan aprovechen anticipadamente los nutrientes presentes en el agua residual.

Los resultados coinciden con la investigación de Infante *et al.* (2012, pp. 162-164) donde se empleó los mismos géneros de microalga para fines de remoción de contaminantes en aguas residuales industriales.

En la figura 22 se muestra la curva cinética de crecimiento de cada género de microalga utilizado en la etapa de tratamiento del agua residual en los fotobioreactores.



Como se observa en la figura anterior el género *Scenedesmus* sp. requiere de más tiempo para adaptarse en comparación al resto, sin embargo al ser cultivado de forma individual alcanza una buena densidad celular.

Los géneros de microalga empleados permanecieron el tiempo que duró su crecimiento exponencial (20 días) ya que durante esta fase es donde la mayor cantidad de contaminantes son removidos del agua residual.

### 3.3.2. Absorbancia de mercurio

Los valores que se muestran hacen referencia a la máxima remoción significativa alcanzada por cada género de microalga, a partir de este día aún existió remoción de mercurio aunque mucho menor en comparación a los días anteriores. En la tabla 16 se observa los resultados de las mediciones de absorbancia, así como la concentración de mercurio correspondiente.

Tabla 16. Concentración y absorbancia de mercurio alcanzada por los géneros empleados en los fotobioreactores.

Géneros de microalga	Concentración inicial (mg/L)	Absorbancia	Concentración final (mg/L)	Absorbancia	Día de inicio	Día final	Días requeridos
<i>Pleurococcus</i> sp.	0.00705	0.085	0.00100	0.014	5	17	12
<i>Chlorella</i> sp.	0.00705	0.085	0.00120	0.016	5	16	11
<i>Scenedesmus</i> sp.	0.00716	0.086	0.00245	0.031	8	18	10
Consortio	0.00713	0.086	0.00131	0.017	5	17	12

Nota explicativa: se muestran los valores de absorbancia con sus respectivas concentraciones de mercurio, además, el día cuando inició la disminución de dicho parámetro. Al final se determinó el periodo de tiempo requerido por cada género y el consorcio de microalgas para alcanzar la máxima remoción en los tratamientos.

En la figura 23 se muestran los tiempos requeridos por los géneros de microalga para remover el mercurio del agua residual.

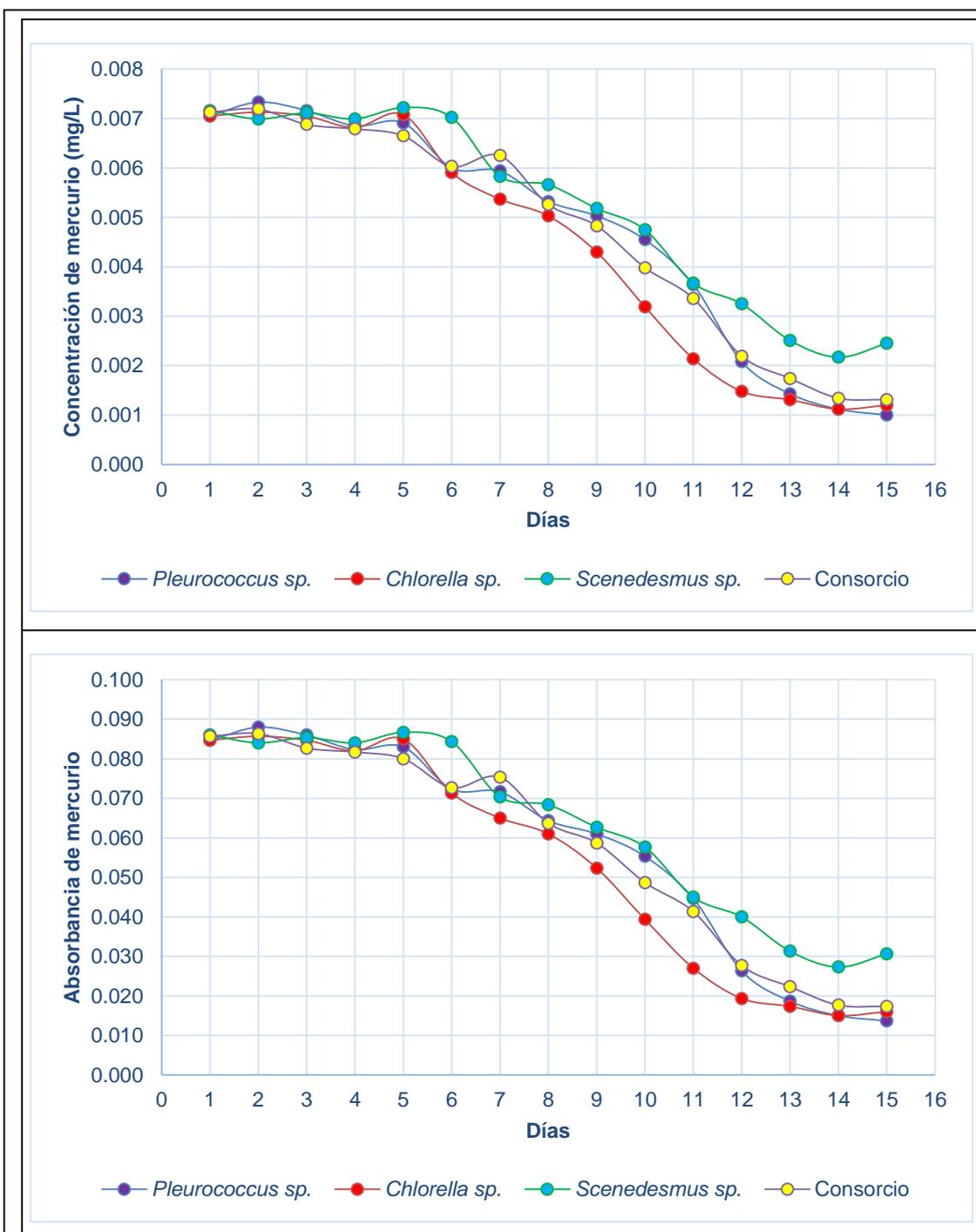


Figura 23. Disminución de mercurio en el agua residual en función del tiempo.

La figura de concentración de mercurio corresponde a las mediciones diarias en función del tiempo y el género de microalga empleado, la figura de absorbancia muestra la disminución diaria del contaminante.

Durante los primeros cinco días se observó que no existió remoción por parte de las microalgas, a partir de la segunda semana los géneros *Pleurococcus* sp., *Chlorella* sp y el consorcio empezaron el proceso de biosorción. El género *Scenedesmus* sp. lo inició a partir del día ocho.

Al comparar los valores de concentración y absorbancia de mercurio con los valores de la densidad celular, se determinó que la relación es inversamente proporcional, es decir a mayor crecimiento, mayor remoción del contaminante, durante la fase de crecimiento exponencial.

### 3.3.3. Porcentaje de remoción

#### 3.3.3.1. Parámetro mercurio

La diferencia estadística entre los géneros de microalgas utilizados fueron establecidas a través de:

#### a) Análisis de varianza ANOVA

A continuación en la tabla 17 se muestra el análisis de varianza (ANOVA) para el porcentaje de remoción de mercurio.

Tabla 17. ANOVA para el porcentaje de remoción de mercurio en función del tiempo.

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	F	Sig.	Valor crítico para F
Microalgas sp * Días	2867.868	42	68.283	4.782	0.000	3.16
Error	1713.540	120	14.279			
Total	391793.827	180				

Según los resultados obtenidos en el análisis de varianza se observa que si existen diferencias significativas entre los tratamientos pues el valor de “F” es mayor al valor de “F crítico”, es decir:

$$4.782 > 3.16$$

Además, el valor de significancia obtenido es menor a 0.05 razones por la cual se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, donde se determina que al menos uno de los tratamientos es diferente en cuanto al porcentaje remoción de mercurio.

Significancia:  $0.00 < 0.05$ ; Existe diferencia altamente significativa

Los géneros *Pleurococcus* sp., *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. y el consorcio alcanzaron porcentajes distintos en la remoción de mercurio del agua residual.

$$H_i = Sp_1 \neq Sp_2 \neq Sp_3 \neq \text{Consortio}$$

### b) Comparaciones múltiples para el parámetro mercurio

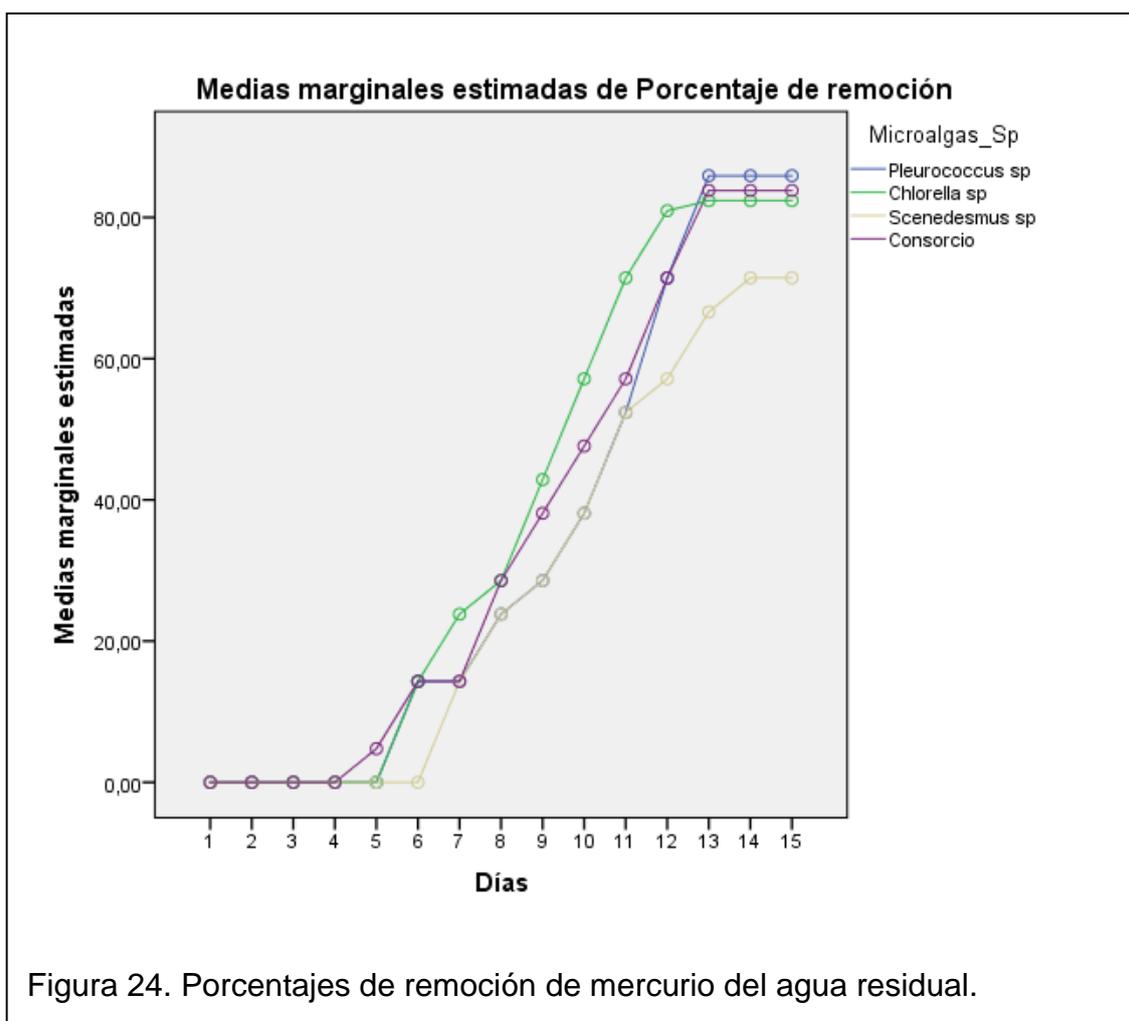
A continuación en la tabla 18 se muestran las significancias entre tratamientos.

Tabla 18. Comparaciones múltiples entre tratamientos por HSD Tukey.

(I) Microalgas_Sp	(J) Microalgas_Sp	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Significancia
<i>Pleurococcus</i> sp	<i>Chlorella</i> sp	-4.3742*	.79665	,112
	<i>Scenedesmus</i> sp	5.1216*	.79665	,000
	Consortio	-1.8042	.79665	,000
<i>Chlorella</i> sp	<i>Pleurococcus</i> sp	4.3742*	.79665	,009
	<i>Scenedesmus</i> sp	9.4958*	.79665	,000
	Consortio	2.5700*	.79665	,000
<i>Scenedesmus</i> sp	<i>Pleurococcus</i> sp	-5.1216*	.79665	,000
	<i>Chlorella</i> sp	-9.4958*	.79665	,000
	Consortio	-6.9258*	.79665	,000
Consortio	<i>Pleurococcus</i> sp	1.8042	.79665	,000
	<i>Chlorella</i> sp	-2.5700*	.79665	,009
	<i>Scenedesmus</i> sp	6.9258*	.79665	,112

La prueba de comparaciones múltiples que se muestra en la tabla 18 determina que no existe una diferencia significativa entre los géneros *Pleurococcus* sp., *Chlorella* sp. y consorcio, que fueron los que mayor porcentaje de remoción alcanzaron. El género *Scenedesmus* sp fue el que menor porcentaje de remoción alcanzó durante los tratamientos. La remoción fue posible ya que el mercurio no es un compuesto esencial para el crecimiento o desarrollo de las microalgas, además la concentración inicial de mercurio del agua residual empleada es mucho menor al límite máximo tolerable de toxicidad que las microalgas pueden ser sometidas (1.0 mg/L) según manifiestan Cordero, Guevara, Morales y Lodeiros (2005, pp. 326-329).

En la figura 24 se muestran los porcentajes de remoción alcanzados por los géneros de microalga.



El mercurio fue removido del agua residual por biosorción y acumulado en la pared celular de las microalgas, de acuerdo a la investigación de Esclapés (2007, pp. 212-216) esto no incide en el contenido lipídico de las mismas.

Pese a que el género *Scenedesmus* sp- tardó más en adaptarse e iniciar el proceso de biosorción, alcanzó un 72.81% de remoción de mercurio mientras que los géneros *Pleurococcus* sp., *Chlorella* sp. y el consorcio alcanzaron el 87.71%, 84.29% y el 85.71% respectivamente.

Al comparar los resultados de la densidad celular con el porcentaje de remoción de mercurio se determina que el género *Scenedesmus* sp. pese a ser el más numeroso fue el que menor cantidad de mercurio removió.

El género *Pleurococcus* sp. fue el que mayor cantidad de mercurio removió gracias a la biopelícula que se formó en la geomembrana, la cual contribuyó a la fijación de metales. El género *Chlorella* sp y el consorcio también formaron una biopelícula en la geomembrana aunque no con la misma densidad que el *Pleurococcus* sp.

La característica de ciertos géneros de microalga de fijarse a una geomembrana y formar biopelículas se debe principalmente a la excreción de una matriz extracelular adhesiva protectora que permite el asentamiento de las microalgas (Noble y Mitchell, 2007, pp. 350-353).

Vilchéz (2005, pp. 99-103) explica que la biopelícula de microalgas contribuye a la remoción de mercurio del agua residual por el contacto directo entre el sorbato (iones metálicos) y el biosorbente (biopelícula de microalgas) de manera repetitiva, aumentando de manera significativa el área de contacto para la biosorción.

A continuación en la figura 25 se compara los valores obtenidos después del tratamiento del agua con la normativa legal vigente.

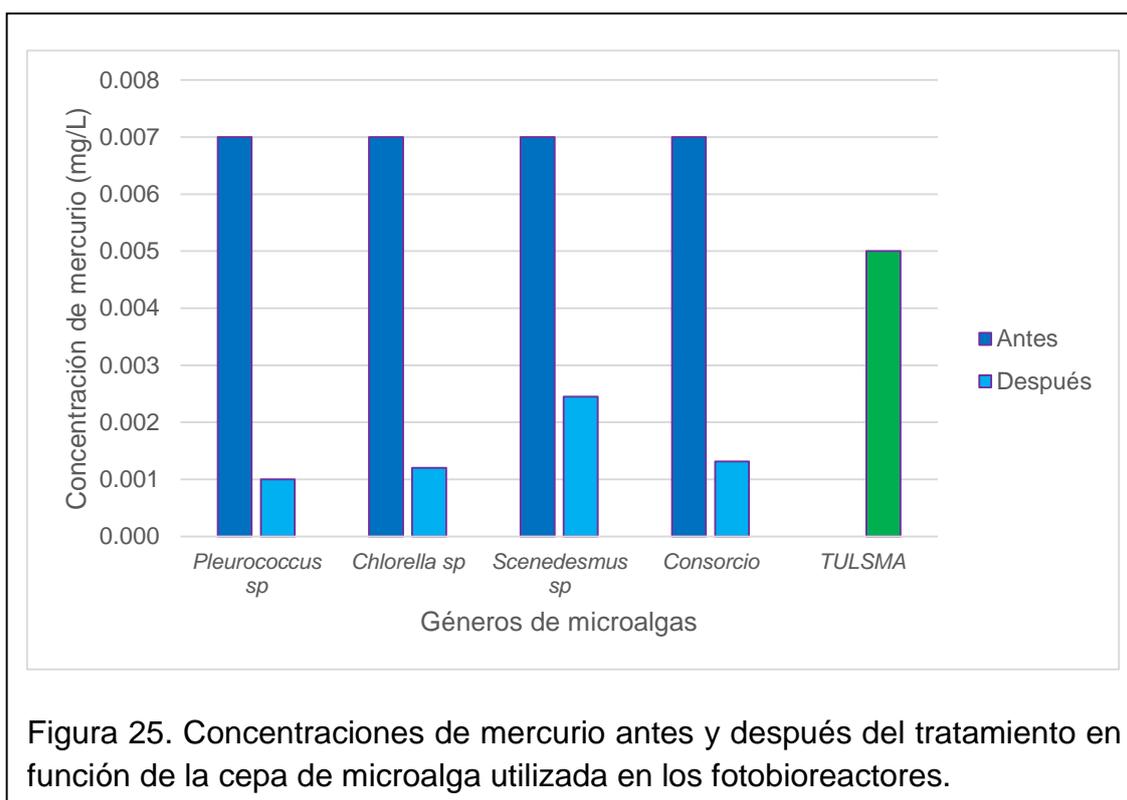


Figura 25. Concentraciones de mercurio antes y después del tratamiento en función de la cepa de microalga utilizada en los fotobioreactores.

Los porcentajes de remoción demuestran que las concentraciones de mercurio del agua residual tratada en los fotobioreactores cumplen con la normativa legal vigente en todos los tratamientos. Los géneros de microalgas empleados y el consorcio de los mismos removieron el contaminante hasta por debajo de la norma establecida (0.005 mg/L), lo que concuerda con el resultado final obtenido por Chu (2003, pp. 125-127) en su investigación.

### 3.3.3.2. Parámetro pH

La diferencia estadística entre los géneros de microalgas utilizados fueron establecidas a través de:

#### a) Análisis de varianza ANOVA

A continuación en la tabla 19 se muestra el análisis de varianza (ANOVA) para el porcentaje de acidificación de pH.

Tabla 19. ANOVA para el parámetro pH.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Sig.	Valor crítico para F
Entre grupos	62.495	3	20.832	1.425	0.305	3.000
Dentro de grupos	116.958	8	14.620			
Total	179.453	11				

Según los resultados obtenidos en el análisis de varianza se observa que no existen diferencias significativas entre los tratamientos pues el valor de “F” es menor al valor de “F crítico”, es decir:

$$1.425 < 3.000$$

Además, el valor de significancia obtenido es mayor a 0.05 razones por la cual se acepta la hipótesis nula, donde se determina que el porcentaje de acidificación de pH en los tratamientos es igual o similar.

Significancia:  $0.305 \geq 0.05$ ; No existe significancia

Se determinó que no existe diferencia estadística significativa entre los géneros *Pleurococcus* sp., *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. y el consorcio.

$$H_0 = Sp_1 = Sp_2 = Sp_3 = \text{Consortio}$$

### b) Prueba de Levene

La prueba de Levene evaluó la igualdad de varianzas. A continuación se muestran los resultados obtenidos en la tabla 20.

Tabla 20. Prueba de homogeneidad de varianzas

Estadístico de Levene	Grados de Libertad1	Grados de Libertad 2	Significancia
.225	3	8	.876

Se observa que la significancia es mayor igual a 0.05; es decir:

Significancia:  $p \geq 0.05$ ; No existe significancia

Se corrobora la aceptación de la hipótesis nula, donde no hubo una diferencia estadística significativa en cuanto al porcentaje de acidificación en los 4 fotobioreactores.

$$H_0 = Sp_1 = Sp_2 = Sp_3 = \text{Consortio}$$

### c) Comparaciones múltiples para el parámetro pH

A continuación en la tabla 21 se muestran las significancias entre tratamientos.

Tabla 21. Comparaciones múltiples entre tratamientos por HSD Tukey.

(I) Algas	(J) Algas	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Significancia
<i>Pleurococcus</i> sp	<i>Chlorella</i> sp	-5.32667	3.12194	,380
	<i>Scenedesmus</i> sp	-1.81333	3.12194	,935
	Consortio	.48667	3.12194	,999
<i>Chlorella</i> sp	<i>Pleurococcus</i> sp	5.32667	3.12194	,380
	<i>Scenedesmus</i> sp	3.51333	3.12194	,685
	Consortio	5.81333	3.12194	,315
<i>Scenedesmus</i> sp	<i>Pleurococcus</i> sp	1.81333	3.12194	,935
	<i>Chlorella</i> sp	-3.51333	3.12194	,685
	Consortio	2.30000	3.12194	,880
Consortio	<i>Pleurococcus</i> sp	-.48667	3.12194	,999
	<i>Chlorella</i> sp	-5.81333	3.12194	,315
	<i>Scenedesmus</i> sp	-2.30000	3.12194	,880

La prueba de comparaciones múltiples que se muestra en la tabla 21 determinó que no existe diferencia estadística significativa, ya que los valores en el nivel de significancia se encuentran por encima de 0.05. El porcentaje de acidificación fue similar en los fotobioreactores. Los géneros de microalga usados generaron porcentajes de acidificación similares.

A continuación en la figura 26 se presentan los valores de pH obtenidos durante los tratamientos.

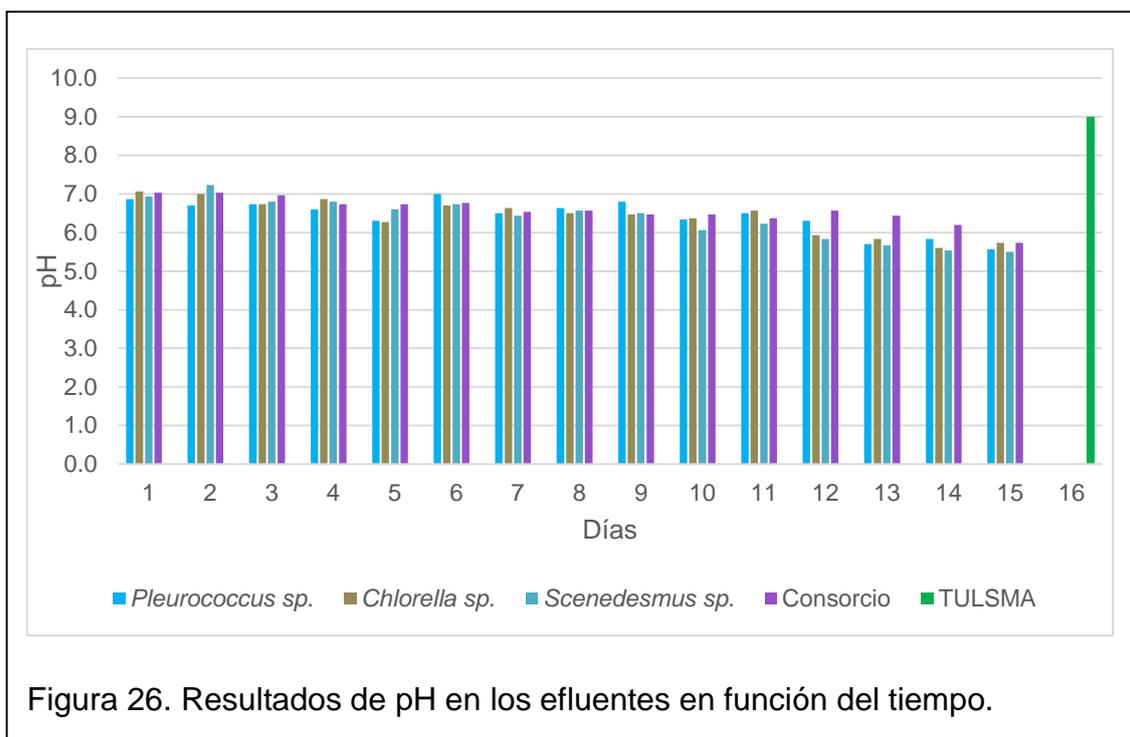


Figura 26. Resultados de pH en los efluentes en función del tiempo.

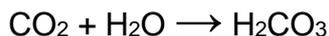
Los valores obtenidos correspondientes al potencial de hidrógeno en los efluentes de los cuatro fotobioreactores se encuentran dentro de los límites máximos permisibles de descargas a un cuerpo de agua dulce (rango de 5 a 9) además de los límites establecidos para aguas de uso agrícola (rango de 6 a 9); por lo tanto los efluentes cumplen con la normativa legal vigente.

El dióxido de carbono es un compuesto esencial en los procesos vitales de las microalgas como la fotosíntesis; en este proceso las microalgas transforman el dióxido de carbono y el agua en compuestos nutricionales como glucosa y en oxígeno. Esto se debe a principalmente a la presencia de  $\text{CO}_2$ , el cual fue inyectado dentro de cada fotobioreactor como fuente nutricional de las microalgas.

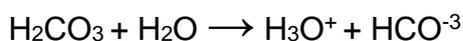
Al contacto con el agua el  $\text{CO}_2$  inyectado genera ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), compuesto que rápidamente forma parte del equilibrio ácido-base del agua. El ácido carbónico es aprovechado por las microalgas, y a la vez tiende a

acidificarla y aumenta la concentración de bicarbonato (Artero, Nogueras, Cervera y Lázaro, 2012, pp. 23-25).

Lo cual concuerda con Spoolman y Miller (2013, pp. 176-182) quienes manifiestan que la presencia de dióxido de carbono en el agua puede cambiar su pH, una vez que el CO<sub>2</sub> se disuelve ligeramente en agua forma ácido carbónico, esta reacción se explica a continuación:



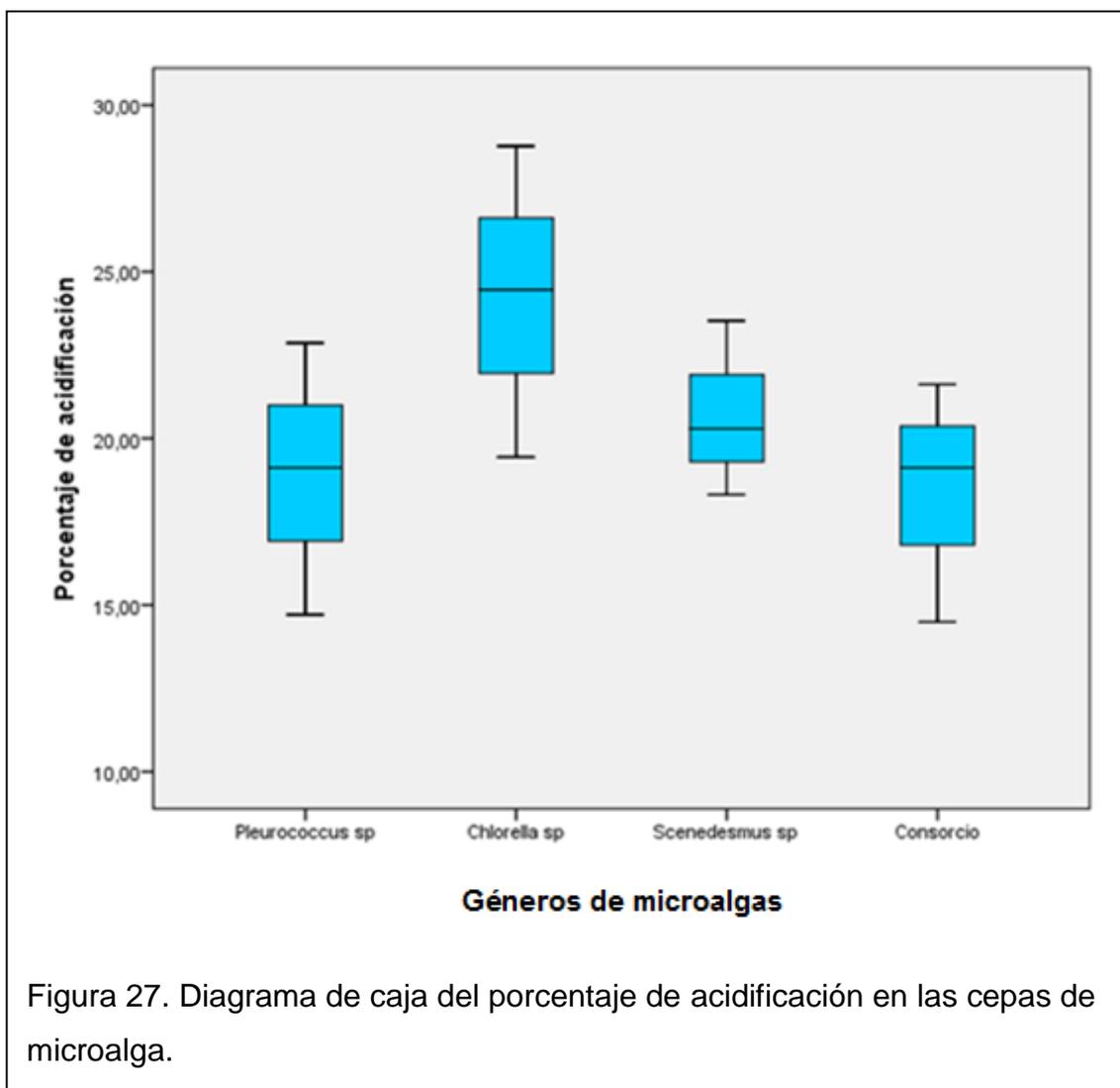
Al reaccionar el ácido carbónico en el agua forma un ion bicarbonato (HCO<sup>3-</sup>) y un catión hidronio (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>), dicha reacción se expresa a continuación:



A través de este comportamiento químico se justifica la acidificación del agua, inicialmente parte de un pH neutro aproximado a 7, una vez que se ha inyectado CO<sub>2</sub> de manera constante durante un determinado periodo de tiempo, tiende a acidificarse llegando a un pH ácido aproximado de 5.5.

#### **d) Análisis descriptivo**

Basado en los resultados obtenidos durante los tratamientos planteados se elaboró el diagrama de caja mostrado a continuación en la figura 27.



Se determinó que el género con mayor porcentaje de acidificación fue *Chlorella* sp con un  $24,22\% \pm 4,67\%$  y el género con menor porcentaje de acidificación fue el consorcio con un valor de  $18,51\% \pm 3,61\%$ .

### 3.3.3.3. Parámetro sulfatos

La diferencia estadística entre los géneros de microalgas utilizados fueron establecidas a través de:

#### a) Análisis de varianza ANOVA

A continuación en la tabla 22 se muestra el análisis de varianza (ANOVA) para el porcentaje de remoción de sulfatos.

Tabla 22. ANOVA para el parámetro sulfatos.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Sig.	Valor crítico para F
Entre grupos	537.953	3	179.318	95.343	.000	3.00
Dentro de grupos	15.046	8	1.881			
Total	553.000	11				

Según los resultados obtenidos en el análisis de varianza se observa que si existen diferencias significativas entre los tratamientos pues el valor de “F” es mayor al valor de “F crítico”, es decir:

$$95.343 > 3.000$$

Además, el valor de significancia obtenido es menor a 0.05 por lo tanto:

$$0.00 \leq 0.01; \text{ existe diferencia altamente significativa}$$

Se acepta la hipótesis alternativa, determinando que existe diferencia estadística significativa en el porcentaje de remoción de sulfatos y al menos uno de los géneros empleados *Pleurococcus* sp., *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. y el consorcio es distinto.

### b) Prueba de Levene

La prueba de Levene evaluó la igualdad de varianzas entre los géneros de microalga utilizados. A continuación se muestran los resultados obtenidos en la tabla 23.

Tabla 23 Prueba de homogeneidad de varianzas.

Estadístico de Levene	Grados de libertad 1	Grados de libertad 2	Significancia
.423	3	8	.007

Se observa que la significancia es menor igual a 0.05; es decir:

$$\text{Significancia: } 0.007 \leq 0.05; \text{ Existe una diferencia altamente significativa}$$

Se corrobora la aceptación de la hipótesis alternativa, debido a que no hubo homogeneidad de varianzas en cuanto al porcentaje de remoción de sulfatos y cada género de microalga removió porcentajes distintos del contaminante.

$$H_i = Sp_1 \neq Sp_2 \neq Sp_3 \neq \text{Consortio}$$

### c) Comparaciones múltiples para el parámetro sulfatos

A continuación en la tabla 24 se muestran las significancias entre tratamientos.

Tabla 24. Comparaciones múltiples entre tratamientos por HSD Tukey.

(I) Algas	(J) Algas	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.
Pleurococcus sp	<i>Chlorella</i> sp	-10.05333*	1.11975	.000
	<i>Scenedesmus</i> sp	6.06667*	1.11975	.003
	Consortio	-9.22333*	1.11975	.000
<i>Chlorella</i> sp	<i>Pleurococcus</i> sp	10.05333*	1.11975	.000
	<i>Scenedesmus</i> sp	16.12000*	1.11975	.000
	Consortio	.83000	1.11975	.878
<i>Scenedesmus</i> sp	<i>Pleurococcus</i> sp	-6.06667*	1.11975	.003
	<i>Chlorella</i> sp	-16.12000*	1.11975	.000
	Consortio	-15.29000*	1.11975	.000
Consortio	<i>Pleurococcus</i> sp	9.22333*	1.11975	.000
	<i>Chlorella</i> sp	-.83000	1.11975	.878
	<i>Scenedesmus</i> sp	15.29000*	1.11975	.000

La prueba de comparación múltiple determina que existe una diferencia estadística altamente significativa entre los géneros de microalgas utilizados. El género *Chlorella* sp y el consorcio fueron los que mayor porcentaje de remoción alcanzaron, a comparación de los géneros *Pleurococcus* sp y *Scenedesmus* sp. El género dominante en el consorcio es *Chlorella* sp, por ende al ser cultivada de forma individual alcanzó el segundo puesto en la remoción de sulfatos.

A continuación en la figura 28 se presentan las concentraciones de sulfatos obtenidas durante los tratamientos.

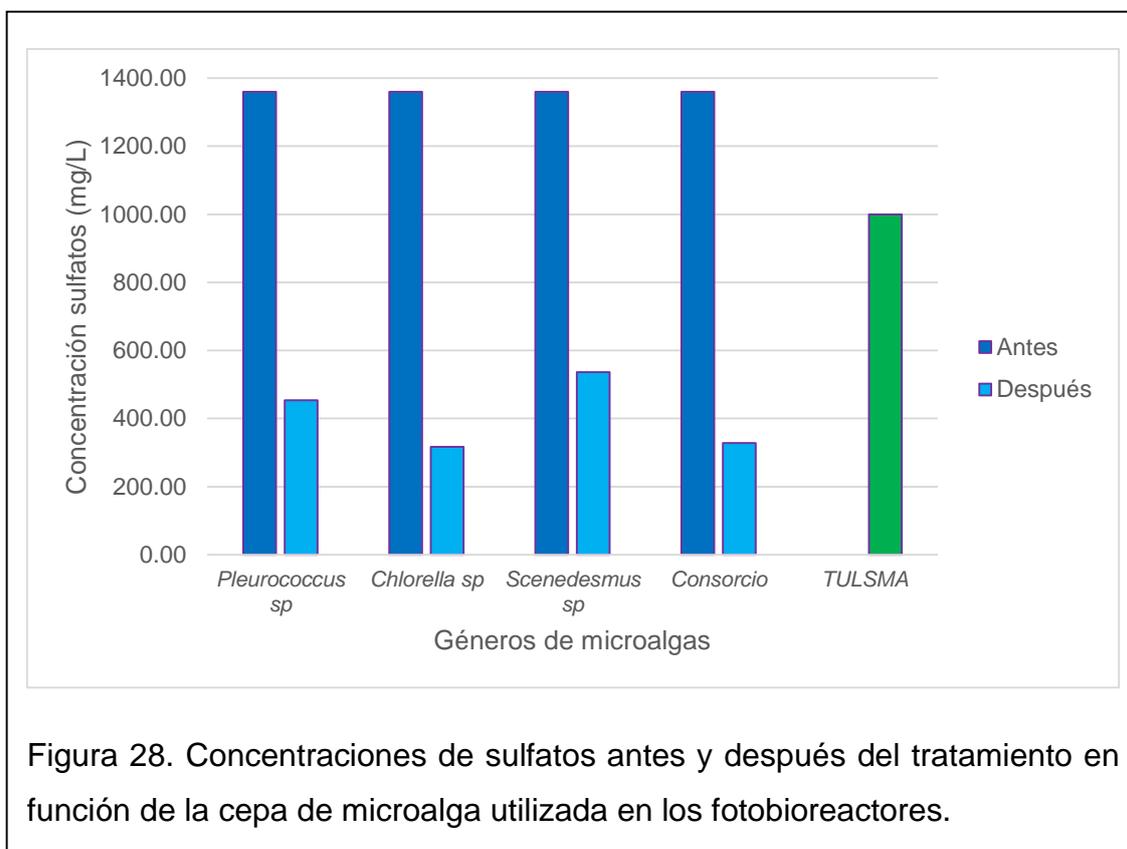


Figura 28. Concentraciones de sulfatos antes y después del tratamiento en función de la cepa de microalga utilizada en los fotobioreactores.

Los porcentajes de remoción demuestran que las concentraciones de sulfatos del agua residual tratada en los fotobioreactores cumplen con la normativa legal vigente en todos los tratamientos. Los géneros de microalga empleados y el consorcio de los mismos removieron el contaminante hasta por debajo de la norma establecida (1000 mg/L).

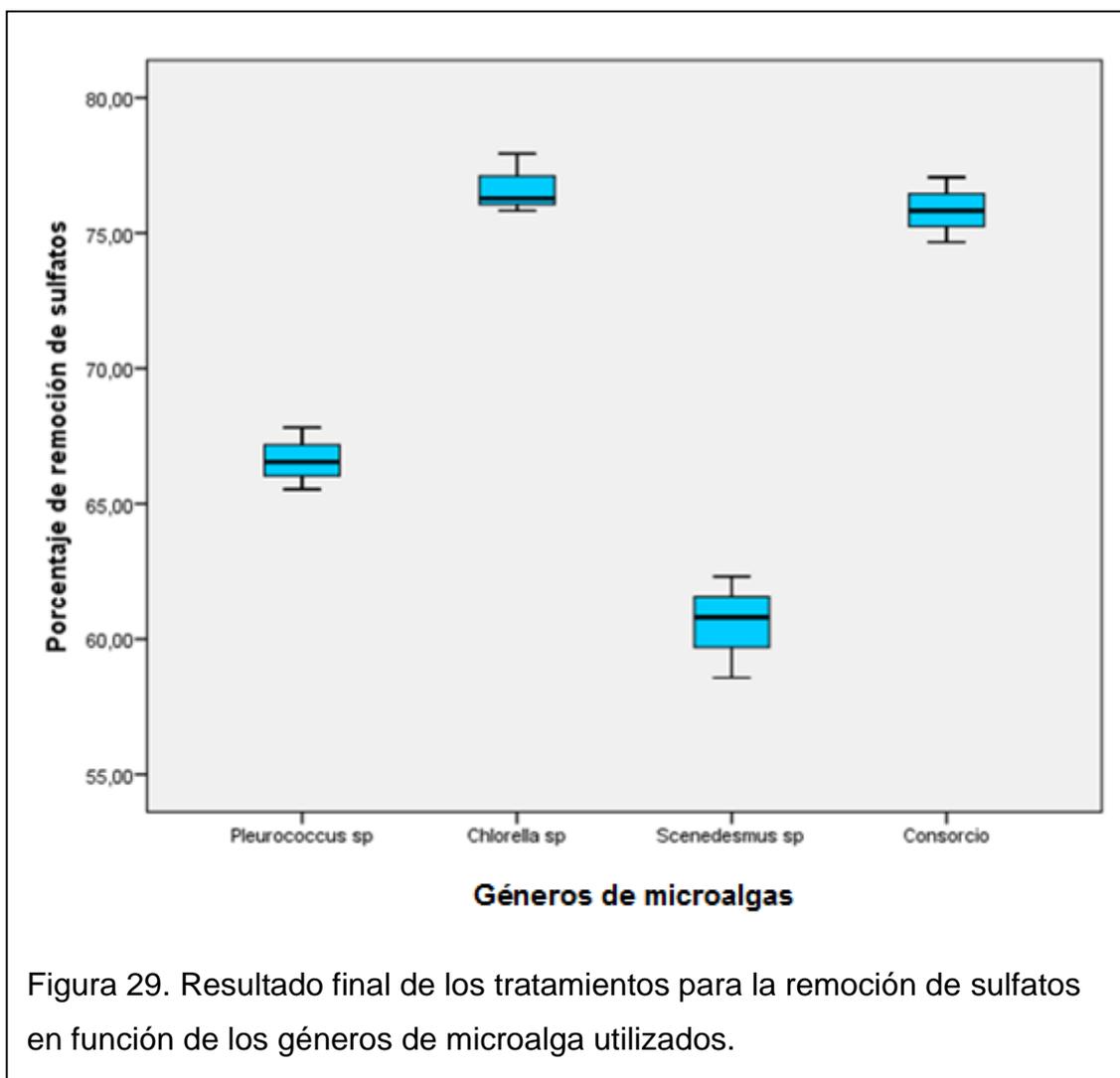
A diferencia de los fosfatos y nitratos, los sulfatos no son indispensables en el crecimiento celular de las microalgas, su objetivo principal es mantener la presión osmótica y el equilibrio de los electrolitos. Son iones que se presentan en los medio de cultivo en gran cantidad aunque a veces no son requeridos por las microalgas. Sin embargo, como manifiestan McCandles y Craige (1979, pp. 43-45) su importancia radica en mantener el equilibrio iónico en el proceso de biosorción.

Según Mera, Torres y Abalde (2014, pp. 92-103) los sulfatos son requeridos por las microalgas como componente activo en el mecanismo de resistencia en medios de cultivo altamente tóxicos. En su investigación Mera, Torres y Abalde utilizaron especies de microalgas de agua dulce para el tratamiento de aguas contaminadas con Cadmio, donde alcanzó una remoción del 97%, tomando en cuenta que el cadmio es una sustancia química común en la extracción del oro, se dedujo que las microalgas al asimilar el sulfato adquirieron resistencia para tratar mercurio.

Además, de acuerdo a Rodríguez Aguilera y Garza (2004, pp. 2-5) al existir remoción de sulfatos es un claro indicador de la baja carga orgánica en el agua residual, lo que cual es confirmado en su investigación donde determina que el límite de carga orgánica no supera los 2.2 g/L en condiciones aerobias, tiempo de retención hidráulica se fijó entre 9 y 11 días para lograr una remoción de sulfatos del 80%. El tiempo de retención fue similar en la presente investigación.

#### **d) Análisis descriptivo**

Basado en los resultados obtenidos durante los tratamientos planteados se elaboró el diagrama de caja mostrado a continuación en la figura 29.



Se determinó que el género *Chlorella* sp. fue el que mayor porcentaje de remoción alcanzó con un  $76.88\% \pm 1.11\%$  y el género con menor porcentaje de remoción fue el *Scenedesmus* sp. con un valor de  $60.56\% \pm 1.88\%$ . El género *Chlorella* sp. pese a ser el género que mayor cantidad de sulfatos removió, no pudo remover tanto mercurio como el género *Pleurococcus* sp., ya que los sulfatos contribuyen al proceso de biosorción manteniendo el equilibrio iónico.

#### 3.3.3.4. Parámetro fosfatos

La diferencia estadística entre los géneros de microalgas utilizados fueron establecidas a través de:

### a) Análisis de varianza ANOVA

A continuación en la tabla 25 se muestra el análisis de varianza (ANOVA) para el porcentaje de remoción de fosfatos.

Tabla 25. ANOVA para el parámetro fosfatos.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	F	Sig.	Valor Crítico para F
Entre grupos	464.383	3	154.794	2.790	.109	3.000
Dentro de grupos	443.831	8	55.479			
Total	908.214	11				

Según los resultados obtenidos en el análisis de varianza se observa que no existen diferencias significativas entre los tratamientos pues el valor de "F" es menor al valor de "F crítico", es decir:

$$2.790 < 3.000$$

Además, el valor de significancia obtenido es mayor a 0.05 razones por la cual se acepta la hipótesis nula, donde se determina que el porcentaje de remoción de fosfatos en los tratamientos es igual o similar.

Significancia:  $0.109 \geq 0.05$ ; No existe significancia

No existe diferencia estadística significativa entre los géneros *Pleurococcus* sp., *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. y el consorcio.

### b) Prueba de Levene

La prueba de Levene evaluó la igualdad de varianzas. A continuación se muestran los resultados obtenidos en la tabla 26.

Tabla 26. Prueba de homogeneidad de varianzas.

Estadístico de Levene	Grados de Libertad 1	Grados de Libertad 2	Significancia
.873	3	8	.494

Se observa que la significancia es mayor igual a 0,05; es decir:

$$0.494 \geq 0.05; \text{ No existe significancia}$$

Se corrobora la aceptación de la hipótesis nula, donde no hubo una diferencia estadística significativa en cuanto al porcentaje de remoción de fosfatos con los géneros *Pleurococcus* sp., *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. y el consorcio.

$$H_0 = Sp_1 = Sp_2 = Sp_3 = \text{Consortio}$$

### c) Comparaciones múltiples para el parámetro fosfatos

A continuación en la tabla 27 se muestran las significancias entre tratamientos.

Tabla 27. Comparaciones múltiples entre tratamientos por HSD Tukey.

(I) Algas	(J) Algas	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.
<i>Pleurococcus</i> sp	<i>Chlorella</i> sp	4.92667	6.08161	.848
	<i>Scenedesmus</i> sp	8.98667	6.08161	.492
	Consortio	-7.70667	6.08161	.606
<i>Chlorella</i> sp	<i>Pleurococcus</i> sp	-4.92667	6.08161	.848
	<i>Scenedesmus</i> sp	4.06000	6.08161	.906
	Consortio	-12.63333	6.08161	.239
<i>Scenedesmus</i> sp	<i>Pleurococcus</i> sp	-8.98667	6.08161	.492
	<i>Chlorella</i> sp	-4.06000	6.08161	.906
	Consortio	-16.69333	6.08161	.095
Consortio	<i>Pleurococcus</i> sp	7.70667	6.08161	.606
	<i>Chlorella</i> sp	12.63333	6.08161	.239
	<i>Scenedesmus</i> sp	16.69333	6.08161	.095

Pese a que la diferencia estadística entre tratamientos no es significativa la prueba de comparaciones múltiples determina que la mayor diferencia se produjo entre los géneros *Scenedesmus* sp. y el consorcio; debido que *Scenedesmus* sp. fue el género que menor cantidad de fosfatos removió en comparación del consorcio que fue el tratamiento más eficiente.

A continuación en la figura 30 se presentan las concentraciones de fosfatos obtenidas durante los tratamientos.

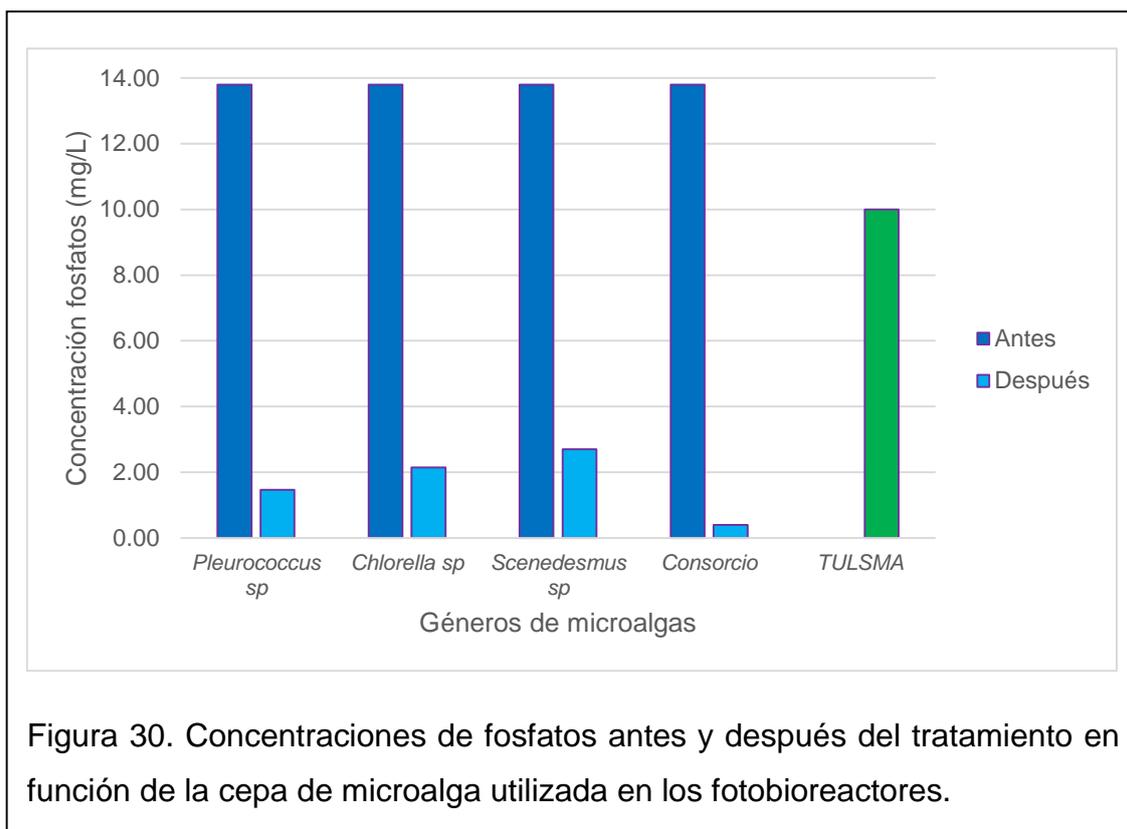


Figura 30. Concentraciones de fosfatos antes y después del tratamiento en función de la cepa de microalga utilizada en los fotobioreactores.

Los porcentajes de remoción demuestran que las concentraciones de fosfatos del agua residual tratada en los fotobioreactores cumplen con la normativa legal vigente en todos los tratamientos. Los géneros de microalga empleados y el consorcio de los mismos removieron el contaminante hasta por debajo de la norma establecida (10 mg/L).

A pesar de que los géneros de microalgas empleados alcanzaron un porcentaje de remoción de fosfatos similar; el consorcio fue el grupo de microalgas más eficiente lo que coincide con los resultados obtenidos en la investigación de Chacón, Andrade, Cárdenas, Araujo y Morales (2004, pp. 104-108) donde en un tiempo de retención de 14 días usando el género *Chlorella sp.* se alcanzó un porcentaje de remoción del 80%, el cual se asemeja al 97% obtenido en esta investigación; *Chlorella sp.* el género dominante del consorcio. De la igual manera en su investigación se determinó que el género *Scenedesmus sp.* fue el menos eficiente en este parámetro.

El porcentaje de remoción de fosfatos del género *Scenedesmus sp.* fue similar al resultado obtenido por Gonzales, Cañizares y Baena (2000, pp. 259-262) en

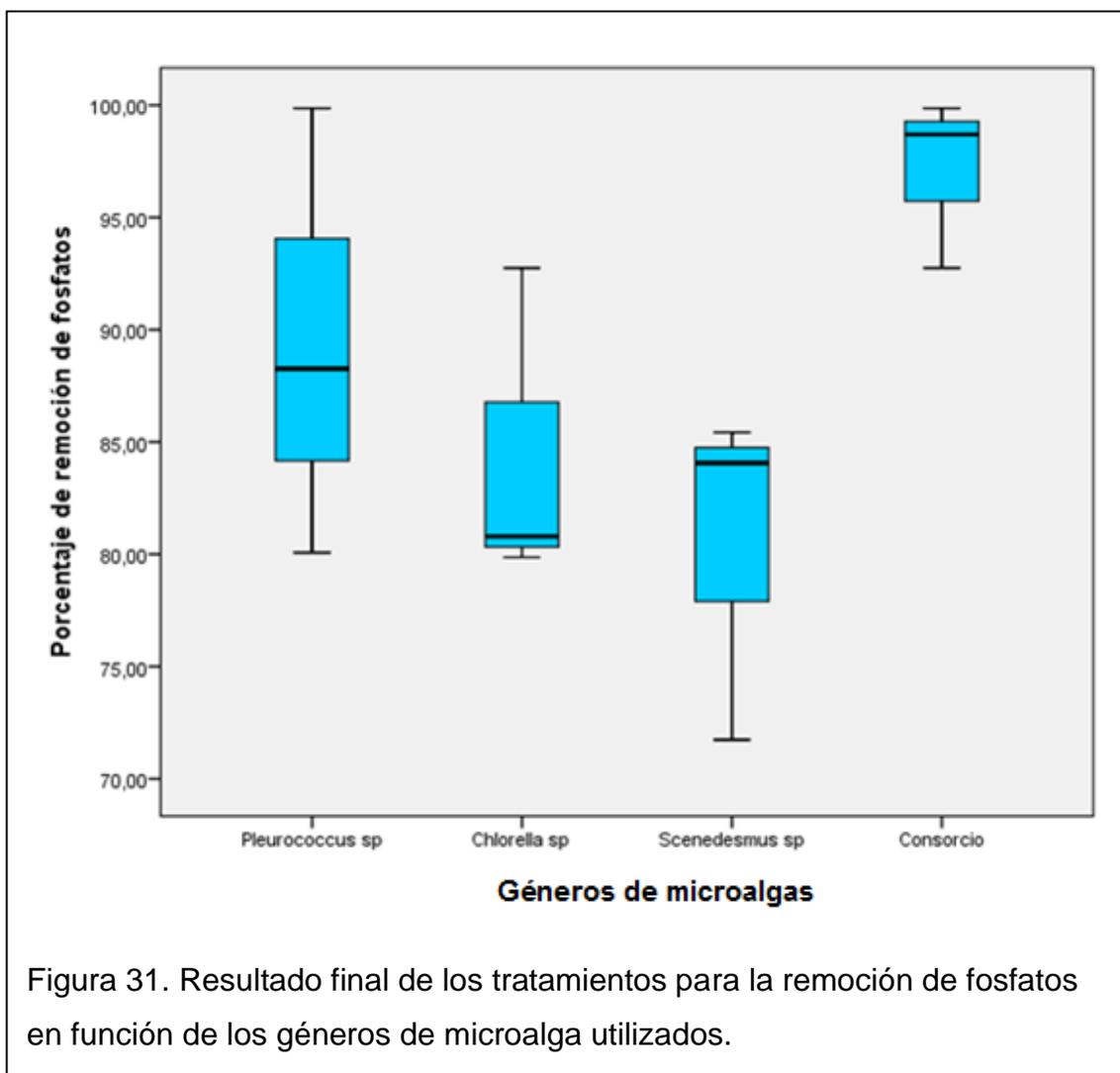
el tratamiento de aguas residuales de la curtiembre, donde se define que el género mencionado al estar en contacto con aguas residuales altamente tóxicas, cambia su metabolismo como mecanismo de resistencia, removiendo una menor cantidad de fosfatos y nutrientes del agua residual.

Uno de los factores críticos para la remoción de fosfatos fue la temperatura, como manifiesta Cruz (2008, pp. 65-73) en su investigación, donde afirma que el mayor porcentaje de remoción de fosfatos se alcanza con una temperatura mayor a 22 ° C, la temperatura en los fotobioreactores fue de 28.5 °C lo que contribuyó al crecimiento de las microalgas y por ende al aprovechamiento de este nutriente. Además de la aireación constante en los fotobioreactores, lo cual influyó de manera considerable en la liberación de fosfatos y posterior remoción por parte de los géneros de microalga empleados en los tratamientos (Belloso, 2000, pp. 2-5).

Los fosfatos son fundamentales en muchos procesos en las microalgas tales como la formación de ácidos nucleicos y transferencia de energía. Además, su deficiencia en el medio de cultivo podría limitar la capacidad de crecimiento y remoción de contaminantes de las microalgas. (Martínez, 2008, p. 226).

#### **d) Análisis descriptivo**

Basado en los resultados obtenidos durante los tratamientos planteados se elaboró el diagrama de caja mostrado a continuación en la figura 31.



De acuerdo a los resultados obtenidos la disminución es notoria y se determinó que el consorcio de cepas fue el que mayor porcentaje de remoción alcanzó con un  $97.10\% \pm 3.81\%$  y el género con menor porcentaje de remoción fue el *Scenedesmus sp* con un valor de  $80.41\% \pm 7.54\%$ .

### 3.3.3.5. Parámetro nitratos

La diferencia estadística entre los géneros de microalgas utilizados fueron establecidas a través de:

### a) Análisis de varianza ANOVA

A continuación en la tabla 28 se muestra el análisis de varianza (ANOVA) para el porcentaje de remoción de nitratos.

Tabla 28. ANOVA para el parámetro fosfatos.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	F	Sig.	Valor crítico para F
Entre grupos	159.815	3	53.272	3.835	.098	3.000
Dentro de grupos	88.138	8	11.017			
Total	247.953	11				

Según los resultados obtenidos en el análisis de varianza se observa que no existen diferencias significativas entre los tratamientos pues el valor de "F" es menor al valor de "F crítico", es decir:

$$3.835 < 3.000$$

Además, el valor de significancia obtenido es mayor a 0.05 razones por la cual se acepta la hipótesis nula, donde se determina que el porcentaje de remoción de nitratos en los tratamientos es igual o similar.

Significancia:  $0.98 \geq 0.05$ ; No existe significancia

No existe diferencia estadística significativa entre los géneros *Pleurococcus* sp, *Chlorella* sp, *Scenedesmus* sp y el consorcio.

### b) Prueba de Levene

La prueba de Levene evaluó la igualdad de varianzas. A continuación se muestran los resultados obtenidos en la tabla 29.

Tabla 29. Prueba de homogeneidad de varianzas

Estadístico de Levene	Grados de libertad 1	Grados de libertad 2	Sig.
1.119	3	8	.397

Se observa que la significancia es mayor igual a 0,05; es decir:

$$0.397 \geq 0.05; \text{ No existe significancia}$$

Se corrobora la aceptación de la hipótesis nula, donde no hubo una diferencia estadística significativa en cuanto al porcentaje de remoción de nitratos con los géneros *Pleurococcus* sp., *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. y el consorcio.

$$H_0 = Sp_1 = Sp_2 = Sp_3 = \text{Consortio}$$

### c) Comparaciones múltiples para el parámetro nitratos

A continuación en la tabla 30 se muestran las significancias entre tratamientos.

Tabla 30. Comparaciones múltiples entre tratamientos por HSD Tukey.

(I) Algas	(J) Algas	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.
<i>Pleurococcus</i> sp	<i>Chlorella</i> sp	4.35333	2.71014	.427
	<i>Scenedesmus</i> sp	6.18000	2.71014	.182
	Consortio	-3.13333	2.71014	.668
<i>Chlorella</i> sp	<i>Pleurococcus</i> sp	-4.35333	2.71014	.427
	<i>Scenedesmus</i> sp	1.82667	2.71014	.904
	Consortio	-7.48667	2.71014	.093
<i>Scenedesmus</i> sp	<i>Pleurococcus</i> sp	-6.18000	2.71014	.182
	<i>Chlorella</i> sp	-1.82667	2.71014	.904
	Consortio	-9.31333*	2.71014	.036
Consortio	<i>Pleurococcus</i> sp	3.13333	2.71014	.668
	<i>Chlorella</i> sp	7.48667	2.71014	.093
	<i>Scenedesmus</i> sp	9.31333*	2.71014	.036

Pese a que la diferencia estadística entre tratamientos no es significativa la prueba de comparaciones múltiples determina que la mayor diferencia se produjo entre los géneros *Scenedesmus* sp. y el consorcio; debido que *Scenedesmus* sp. fue el género que menor cantidad de nitratos removió y el consorcio fue el tratamiento más eficiente.

A continuación en la figura 32 se presentan las concentraciones de fosfatos obtenidas durante los tratamientos.

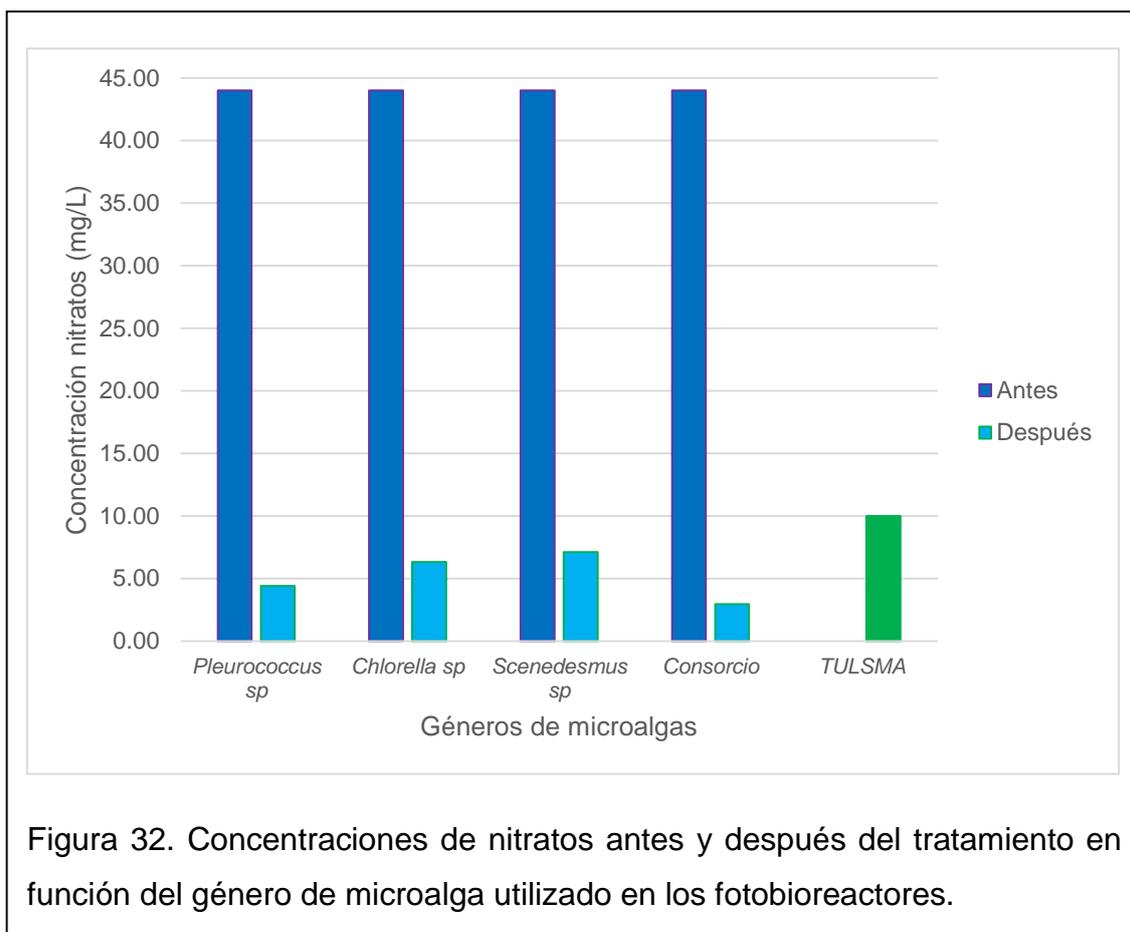


Figura 32. Concentraciones de nitratos antes y después del tratamiento en función del género de microalga utilizado en los fotobioreactores.

Los porcentajes de remoción demuestran que las concentraciones de nitratos del agua residual tratada en los fotobioreactores cumplen con la normativa legal vigente en todos los tratamientos. Los géneros de microalga empleados y el consorcio de los mismos removieron el contaminante hasta por debajo de la norma establecida (10 mg/L).

Las microalgas removieron casi en la totalidad los nitratos del agua residual, Brennan y Owende (2010, pp. 557-562) realzan la eficiencia de estos microorganismos para la asimilación de nitratos en su investigación, donde determinaron que los nitratos son esenciales en el crecimiento microalgal por lo que los incorporan por absorción directa.

El consorcio fue el más eficiente en la remoción de nitratos, seguido por los géneros *Pleurococcus sp.* y *Chlorella sp.* Li *et al.* (2011, pp. 5139-5143 ) corroboran el alto porcentaje de remoción de nitratos y amonio empleando

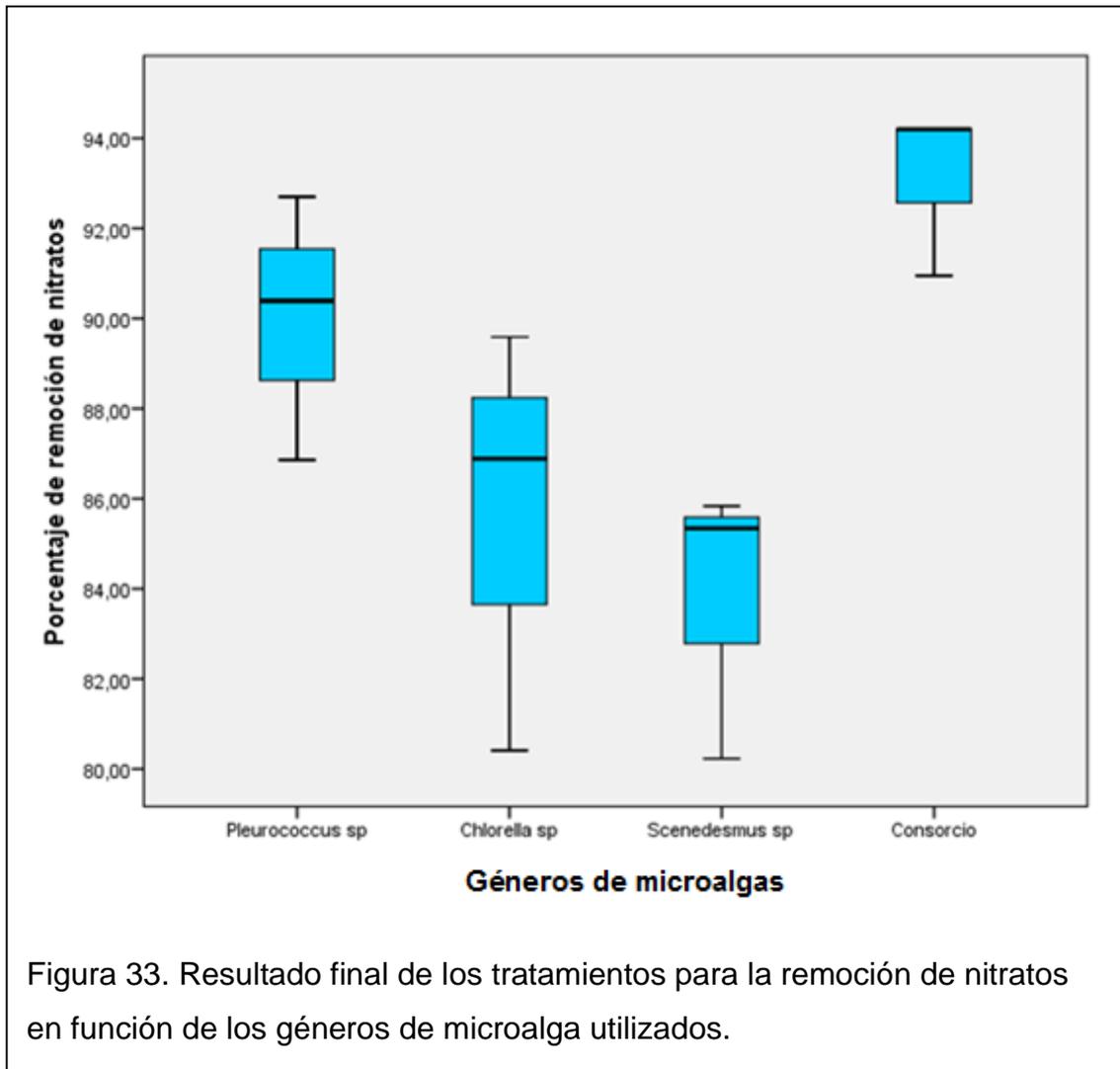
*Pleurococcus* sp. y *Chlorella* sp. en su investigación, donde alcanzaron una remoción del 82.5% al 100%.

El género *Scenedesmus* sp. fue el menos eficiente, sin embargo Abdel-Raouf, Al-Homaidan e Ibraheem (2012, pp. 262-268). al emplear este mismo género de microalga en el tratamiento de aguas residuales municipales obtuvieron un resultado del 100% en la remoción de nitratos y nitritos, por lo que se deduce que la presencia de metales pesados influyó de manera directa en la capacidad de absorción de nutrientes como nitratos del género *Scenedesmus* sp.

Al comparar el porcentaje de remoción de nitratos con el de fosfatos, se determinó que las microalgas asimilaron mayor cantidad de nitratos, esto se debe a que los nitratos y nitritos son la fuente secundaria de nutrientes para las microalgas después del CO<sub>2</sub> (Dávila, 2013, pp. 44-50).

#### **d) Análisis descriptivo**

Basado en los resultados obtenidos durante los tratamientos planteados se elaboró el diagrama de caja mostrado a continuación en la figura 33.



De acuerdo a los resultados obtenidos la disminución es notoria y se determina que el consorcio de cepas fue el que mayor porcentaje de remoción alcanzó con un  $93.12\% \pm 1.87\%$  y el género con menor porcentaje de remoción fue el *Scenedesmus* sp. con un valor de  $83.80\% \pm 3.10\%$ . Al comparar los porcentajes de remoción de nitratos con investigaciones similares se determinó que los resultados obtenidos están dentro del rango establecido.

## 4. CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

- Para la producción del volumen de biomasa requerido en el tratamiento del agua contaminada en los fotobioreactores, factores como la purificación y escalamientos practicados en la etapa de cultivo, hasta llegar a la implementación del sistema con la capacidad de cinco litros, fueron fundamentales para la calidad de los géneros de microalgas utilizadas ya que el espacio físico para el crecimiento de los cultivos es directamente proporcional a su densidad celular.
- La selección de cepas fue determinada por la capacidad de adaptación de los géneros de microalgas a medios de cultivo altamente tóxicos y la tasa de crecimiento de cada uno, de esta manera de las nueve cepas iniciales se escogieron las tres que mejor crecimiento celular alcanzaron durante el tiempo de retención durante el cultivo en el agua residual colectada, los géneros fueron *Pleurococcus* sp., *Chlorella* sp. y *Scenedesmus* sp.
- El sistema de cinco litros brindó las condiciones óptimas para el crecimiento y desarrollo de las microalgas durante el tratamiento del agua residual, permitiendo controlar las condiciones físicas de manera más eficiente que en los volúmenes menores utilizados en la etapa de escalado.
- La caracterización inicial del agua colectada mostró que correspondía a un agua residual típica de la extracción artesanal de oro, con la presencia de metales pesados, incumpliendo con los límites máximos permisibles de descargas a cuerpos de agua dulce.
- Todos los tratamientos planteados alcanzaron un alto porcentaje de remoción de mercurio, fosfatos, sulfatos y nitratos, haciendo que el agua residual tratada cumpla con el límite máximo permisible de la normativa legal vigente para cada uno de los parámetros mencionados.

- El género *Scenedesmus* sp. pese a que alcanzó una densidad celular alta durante el tratamiento del agua residual fue el menos eficiente en la remoción de nitratos y sulfatos. Fue más eficiente cultivado de manera individual ya que fue el género que menor densidad celular alcanzó en el consorcio de microalgas.
- *Chlorella* sp. fue el género dominante del consorcio abarcando un 48% del mismo, pese a que cultivado de manera individual no alcanzo la mayor densidad celular de los géneros utilizados. Fue más eficiente cultivado en forma de consorcio con los otros géneros empleados en la remoción de nitratos, fosfatos y sulfatos donde alcanzó el segundo lugar.
- El consorcio de microalgas fue el más eficiente en la remoción de nitratos, fosfatos y sulfatos con un porcentaje de remoción del 97%, 93% y 76% respectivamente. Dichos parámetros influenciaron de manera directa para que el consorcio alcanzara la mayor densidad celular durante los tratamientos del agua residual. Los géneros *Pleurococcus* sp., *Chlorella* sp. y *Scenedesmus* sp. fueron más eficientes cultivados en consorcio que de manera individual para la remoción de dichos parámetros.
- Los tratamientos donde se utilizó el género *Pleurococcus* sp. fueron los que menor porcentaje de acidificación presentaron, lo que quiere decir que este género aprovechó mayor cantidad de CO<sub>2</sub>, *Chlorella* sp. fue el género que menor cantidad asimiló, por lo que aprovechó los nitratos, fosfatos y sulfatos como fuente de nutrientes.
- Uno de los factores determinantes en la remoción de mercurio del agua residual del género *Pleurococcus* sp. fue la capacidad de formar una biopelícula en la geomembrana del fotobioreactor para el proceso de biosorción microalgal.
- Finalmente, el tratamiento más eficiente para la eliminación de mercurio del agua residual fue el que usó el género *Pleurococcus* sp. alcanzando el 88% de remoción en un periodo de 12 días. Este género demostró ser más eficiente cultivado de manera individual que en consorcio.

## 4.2. Recomendaciones

- La presente investigación estudió, evaluó y controló la mayor cantidad de variables que tienen relación directa con el sistema de tratamiento propuesto, sin embargo, no está exento de factores que no se hayan tomado en cuenta, por lo que se recomienda continuar con la investigación de este sistema con el fin de verificar otras variables que puedan afectar a la operación de los fotobioreactores en el tratamiento de aguas residuales y al crecimiento de las cepas de microalgas.
- Se recomienda experimentar con el tratamiento de otro tipo de aguas residuales industriales y/o domésticas, que contengan contaminantes que no sean metales pesados, químicos inorgánicos o elementos que puedan afectar al desarrollo de las microalgas, a fin de verificar la eficiencia de la remoción con estos microorganismos, así como el crecimiento de la biomasa en esas condiciones para otros aprovechamientos.
- La aplicación de CO<sub>2</sub> en los tratamientos del agua residual resultó ser excesivo, razón por la cual el agua se tendió a acidificarse, por lo que se recomienda tomar en cuenta la capacidad de absorción de CO<sub>2</sub> de los géneros de microalgas utilizados para futuras investigaciones en este campo.

## 5. REFERENCIAS

- Abdel-Raouf N., Al-Homaidan A. e Ibraheem I. (2012). *Microalgae and wastewater treatment*. Saudi Journal of Biological Sciences. Volume 19 (3<sup>a</sup> edition). Riyadh, Saudi Arabia: Botany and microbiology department.
- Albarracín I. (2007). *La producción de Biocombustibles con eficiencia, estabilidad y equidad*. XV Simposio Electrónico Internacional. Buenos Aires, Argentina: Centro de Estudios Internacionales para el Desarrollo.
- Agencia de Regulación y Control Minero (2013). *Foro Minero 2013. Experiencias Internacionales. Canadá, Chile, Perú*. Quito, Ecuador: ARCOM.
- Agencia de Regulación y Control Minero. (2012). *Minería en el Ecuador: pequeña y gran escala, coordinaciones regionales*. Recuperado el 14 de Enero de 2015 de <http://www.arcom.gob.ec/index.php/coordinacionesregionales/machala.html>
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. ATSDR, (2009). *Mercurio, hoja informativa*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2015 de [http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts46.pdf](http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts46.pdf)
- Arnold M. (2013). *Sustainable algal biomass products by cultivation in waste water flows*. VTT Technology. Espoo, Finland: Technical Research.
- Artero C., Nogueras A., Cervera M. y Lázaro A. (2012). *pH sensor. "Instrumentation viewpoint"*. Volumen 22, número 13.
- Banco central del Ecuador (2014). *Promoción de Exportaciones e Inversiones*. Recuperado el 28 de marzo de 2015 de <http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2014/09/PERFIL-DE-MINERIA-IED1>
- Bellinger E. y Sigee D. (2010). *Freshwater Algae Identification and Use as Bioindicators* (1<sup>a</sup>. Edición). West Sussex, UK: Wiley-Blackwell
- Belloso C. (2000) *Desarrollo de cepas microbianas autóctonas con capacidad degradadora de sustancias orgánicas contenidas en efluentes industriales*. Rosario, Argentina: Universidad Católica de Argentina.

- Beltrán A. y Eguiguren J. (2010). *Políticas públicas municipales como herramienta de control socio-ambiental en las actividades de explotación minera de la provincia de Zamora Chinchipe*. Loja, Ecuador; Universidad Particular de Loja.
- Bermeo A. (2005). *Agua – Saneamiento – Asentamientos Humanos*. Quito, Ecuador. Ministerio del Ambiente.
- Betancourt O., Chalen C., Merino C., Maldonado M., Narvaez A. y Guerron L. (2001). *La pequeña minería del oro: impactos en el ambiente y la salud humana en la cuenca del Puyango, sur del Ecuador* (1ª. Edición). Quito, Ecuador: FUNSAID.
- Brennan L y Owende P. (2010). *Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volumen 14 (1ª edición): Dublin, Ireland.
- Campos V., González M. y Vázquez G (2013). *Cultivo y elaboración de un producto comestible de Chlorella vulgaris* Distrito Federal, México: Escuela Nacional Preparatoria 2.
- Cañizares R. (2000). *Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana*. Revista Latinoamericana de microbiología, volumen 42, (3ª edición). México D.F, México: Centro de investigación y estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional.
- Chacón C., Andrade C., Cardenas C., Araujo I. y Morales E. (2004). *Uso de Chlorella sp y Scenedesmus sp. En la remoción de Nitrógeno, Fosforo y DQO de aguas residuales urbanas de Maracaibo, Venezuela*. Boletín del centro de investigaciones biológicas (1ª edición). Zulia, Venezuela: Centro de Investigación del Agua (CIA), Facultad de Ingeniería.
- Chu K. (2003). *Prediction of two metal biosorption equilibria using neutral network*. The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection, volume 3 (1<sup>st</sup> edition).
- Cisneros P. (2008). *El dialogo minero en el Ecuador, señales de una nueva relación entre comunidades, Empresas extractivas y Estado*. Quito, Ecuador: FLACSO.

- Cisneros P. (2013). *¿Cómo se construye la sustentabilidad ambiental?: Experiencias conflictivas de la industria minera en Ecuador*. Quito, Ecuador: Facultad de Ciencias Sociales, Ecuador, Atrio.
- Cordero J., Guevara M., Morales E. y Lodeiros C. (2005) *Efecto de metales pesados en el crecimiento de la microalga tropical Tetraselmis chuii (Prasinophyceae)*. Cumandá, Venezuela: Instituto Oceanográfico de Venezuela.
- Cruz D. (2008). *Remoción de metales por microorganismos productores de polisacáridos*. Santiago de Queretaro, Queretaro: Centro de investigación en ciencia aplicada y tecnología avanzada.
- Cuizano N. y Navarro A. (2008). *Biosorción de metales pesados por algas: posible solución a la contaminación a bajas concentraciones*. Madrid, España: Real Sociedad Española de Química.
- Dávila A. (2013). *Evaluación de las condiciones de cultivo autótrofo de microalgas Chlorella para la producción de biodiesel*. Quito, Ecuador: Universidad San Francisco de Quito.
- Environmental Protection Agency, EPA (2014). *Mercury*. Recuperado el 19 de Enero de 2015 de <http://www.epa.gov/espanol/mercurio/>
- Esclapés M. (2007). *Protocolos estándares para bioensayos de toxicidad con especies acuáticas y terrestres. Versión 2.0*. Caracas, Venezuela: Gerencia General de Tecnología, Departamento de Ecología y Ambiente. INTEVEP.
- Escorihuela A., Nuñez M., Rosales N., Mora R., Morales E. (2007). *Microalgas presentes en una laguna para pulimento de efluentes de una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas*. Revista de la Facultad de Agronomía de La Universidad del Zulia. Volumen 24 (1ª edición). Zulia, Venezuela: Universidad del Zulia.
- Espinoza G. (2008). *Fundamentos de evaluación de impacto ambiental*. Santiago, Chile: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Flores L. (2009). *Análisis estadístico descriptivo*. Lima, Perú: Universidad Inca Garcilaso de la Vega.

- Gale L. y Wixson B. (2012). *Removal of heavy metals from industrial effluents by algae*. Development Industrial Microbiology.
- Gaona X. (2004). *El mercurio como contaminante global desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente*. Barcelona-España: Universidad Autónoma de Barcelona.
- García A. (2013). *Assessment of water pollution due to mercury pouring*. Journal Technology, Volume12, (1<sup>st</sup> edition).
- Gonzalez L., Cañizares S. y Baena S. (2000). *Efficiency of ammonia and phosphorus removal from a Colombial Agroindustrial Wastewater by the Microalgae Chlorella vulgaris and Scenedesmus dimorphus*. Bioresource Technology Magazine Vol. 60 (1<sup>st</sup> edition): Bogotá, Colombia.
- González M. y Saldarriaga J. (2008). *Remoción biológica de materia orgánica, nitrógeno, fósforo en un sistema tipo anaerobio-anóxico-aerobio*. Antioquia, Colombia: Escuela de Ingeniería de Antioquia.
- Graeme K. y Pollack C. (1998). *Heavy metal toxicity, part 1: arsenic and mercury*. Journal Emergency Medicine, volumen 16 (1<sup>a</sup> edición).
- Guevara M. y Zaldumbide D. (2010). *La agonía del Puyango: agua, minería y contaminación*. Quito, Ecuador: Facultad de Ciencias Sociales. FLACSO.
- Guillard R. y Sieracki M. (2005). *Counting cells in cultures with the light microscope in Algal Culturing Techniques*. (1<sup>a</sup> edición). Arizona, Estados Unidos: Elsevier Academic Press.
- Gutiérrez, H. y De la Vara, R. (2008). *Análisis y Diseño de Experimentos*. (2<sup>a</sup> edición). Mexico, D.F: McGraw Hill. Interamericana.
- Herrera P. y Millones O. (2012). *Aproximando el costo de la contaminación minera sobre los recursos hídricos: metodologías paramétricas y no paramétricas*. Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Hirata R., Thomson T., Smith A., Andrew G., McGrea A. y Lopez R. (2005). *Cultivo de microalgas y cianobacterias* (1<sup>a</sup> edición). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO (Food and Agriculture Organization).

- Hursthouse A. (2008). *The Relevance of Speciation in the Remediation of Soils and Sediments Contaminated by Metallic Elements-An Overview and Examples from Central Scotland, UK*. Journal of Environmental Monitoring Volume 3, (1<sup>st</sup> edition). Paisley, United Kingdom: Department of Chemistry and Chemical Engineering.
- Infante C, Angulo E., Zárate A., Florez J., Barrios F. y Zapata C. (2012). *Propagación de la microalga Chlorella sp. en cultivo por lote: cinética del crecimiento celular*. Revista Avances en Ciencias e Ingeniería. Volumen 3, (2<sup>a</sup> edición). Barranquilla, Colombia.
- Johnson M. (2011). *Contaminación por mercurio en el Amazonas: la silvicultura puede ser una solución duradera a un problema sanitario y ecológico*. CIID, Ottawa, Canadá.
- Kim S., Ma H., Allen H. y Cha D. (2002). *Influence of dissolved organic matter on the toxicity of copper to Ceriodaphnia dubia: effect of complexation kinetics*. Environmental Toxicology and Chemistry. Vol. 18, (11<sup>th</sup> edition).
- Krishnamurti, G. y Naidu R. (2009). *Speciation and phytoavailability of cadmium in selected surface soils of South Australia*. Australian Journal of Soil Research, volumen 38, (5<sup>a</sup> edición).
- Kuhn, R. (2011). *No Todo lo que Brilla es Oro en el País. Conflictos Socio Ambientales alrededor de dos proyectos de minería a gran escala en Ecuador*. Quito, Ecuador; Universidad Simón Bolívar.
- Laboratorio de Biotecnología Energética, BIOTEC (2015). *Proyectos y objetivos de investigación*. Recuperado el 19 de Enero de 2015 de [http://www.biotec.ec/index.php?option=com\\_content&view=article&id=3&Itemid=122](http://www.biotec.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=3&Itemid=122)
- León C. y Chaves D. (2010). *Tratamiento de residual vacuno utilizando microalgas, la lenteja de agua Lemna aequinoctiales y un humedal subsuperficial en Costa Rica*. Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental Algal (1<sup>ra</sup> edición). Costa Rica, Costa Rica.
- Ley de Minería. (2009). Registro Oficial 517 del 29 de enero de 2009.

- Li Y., Chen Y-F., Chen P., Min M., Zhou W., Martinez B., Zhu J. y Ruan R. (2011). *Characterization of a microalga Chlorella sp. well adapted to highly concentrated municipal wastewater for nutrient removal and biodiesel production*. Bioresource Technology vol.102 (2ª edición): Shangai, China.
- Lundquist K., Benemann G., Feffer S. y Woertz H. (2007). *Presentation on nutrient removal and biofuel production through microalgae-based wastewater treatment*. First western forum on energy & water sustainability.
- Mansilla H., Lizama C., Gutarra A. y Rodriguez J. (2012). *Tratamiento de Residuos Líquidos de la industria de Celulosa y Textil*. Buenos Aires, Argentina.
- Marín S. (2011). *Aporte dinámico de cianuro, mercurio, plomo y arsénico en los cauces naturales de los ríos Calera y Amarillo en el distrito minero Portovelo- Zaruma*. Recuperado el 03 de noviembre de 2015 de <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/2237/3/Antonio.pdf>.
- Martínez L. (2008). *Eliminación de CO<sub>2</sub> con microalgas autóctonas*. Tesis Doctoral. León, España: Instituto de Recursos Naturales, Universidad de León.
- McCandles E. y Craige J. (1979). *Sulfated polysaccharides in Red and Brown Algae*. Annual Review of Plant Physiology. Vol. 30, (2ª edición).
- Mera R., Torres E. y Abelde J. (2014). *Sulphate, more than a nutrient, protects the microalga Chlamydomonas moewusii from cadmium toxicity*. Aqual Toxicol.
- Mesquidaz E., Negret J. y Hernández J. (2013). *Exposición a mercurio en trabajadores de una mina de oro*. Revista Salud Uninorte. Vol 29 (1ª edición).
- Ministerio de Ambiente del Ecuador (2013). *Estudio para conocer los potenciales impactos ambientales y vulnerabilidad relacionada con las sustancias químicas y tratamiento de desechos peligrosos en el sector productivo del Ecuador*. Quito, Ecuador: MAE.

- Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos. (2015). *Catálogo de Inversiones de los Sectores Estratégicos 2015 – 2017*. Recuperado el 08 de noviembre de 2015 de <http://www.sectoresestrategicos.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2015/04/Primera-parte-Cata%CC%81logo-de-Inversiones-de-los-Sectores-Estrate%CC%81gicos-2015-2017.pdf>
- Monge O., Guerrero P. y Almendáriz F. (2009); *Capacidad de adsorción del cobre utilizando un consorcio bacteriano aislado del río San Pedro, Sonora; XXVIII Convención Minera Internacional*. Veracruz, México.
- Mora G. (2012). *Historia y actualidad explotación minera Cantones Zaruma y portovelo Provincia de El Oro*. El Oro, Ecuador.
- Norma Técnica Ecuatoriana para el Agua. Calidad del agua. (1998). *Muestreo. Manejo y conservación de muestras*. Quito, Ecuador. Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Núñez R. (2013). *Técnicas in vitro para la biorremediación de cromo y plomo; CARTAGO*. Costa Rica, Costa Rica: Escuela de Biología del Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Organización Mundial de la Salud, OMS (2013). *El mercurio y la salud*. Recuperado el 14 de Enero de 2015 de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs361/es/>
- Ospina C., Montoya J. y García J. (2012). *Oportunidades de producción más limpia en tintorerías del sector textil*. Scientia Et Technica No.37, Universidad Tecnológica de Pereira.
- Oswald W., Gotaas H., Ludwig H y Lynch V. (1953). *Algae symbiosis in oxidation ponds. Photosynthetic oxygenation*. Sewage and Industrial Wastes Volumen 25 (6<sup>th</sup> edition).
- Oyadomari J. (2011). *Keweenaw: Algae. A collection of freshwater algae (and protozoans) from Keweenaw Peninsula, MI*. Finlandia University, Hancock, MI, Michigan Technological University, Houghton MI.

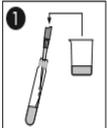
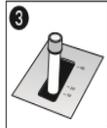
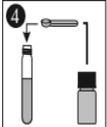
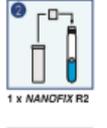
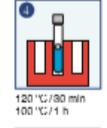
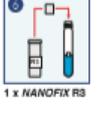
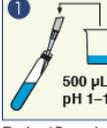
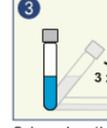
- Pellón A., Frades J., Chacón A., Pérez E., Oña A., Espinosa C., Ramos A., Mayarí R. y Escobedo R. (2013). *Eliminación de cromo y cadmio mediante Scenedesmus obliquus en estado inmovilizado*. Revista CENIC. Ciencias Químicas, vol. 36, (3ª edición), La Habana, Cuba: Centro Nacional de Investigaciones Científicas.
- Pillajo E. (2011). *Minería al servicio de los ecuatorianos*. Quito, Ecuador: Fungeomine.
- Pineda E. (2010). *Análisis de la contaminación por Cianuro, Mercurio, Plomo y Arsénico, en los Ríos Calera y Amarillo derivada de la explotación minera*. Quito, Ecuador: Universidad Técnica Particular de Loja.
- Porras L. (2000). *Diseño Estadístico de Experimentos, Análisis de la Varianza y Temas Relacionados: Tratamiento Informático mediante SPSS*. Proyecto Sur de Ediciones. Granada, España: Universidad de Granada.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), European Regional Centre for Ecohydrology (ERCE) y UNESCO. (2008). *Water Quality for Ecosystems and Human Health*. Recuperado el 18 de Diciembre de 2014 de <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>
- Ramos A. y Bertucco D. (2012). *Crecimiento de microalgas en aguas residuales para mejorar la eficiencia energética del proceso de producción de biocrudo*. Padova, Italia: Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Pádua.
- Rodríguez J., Aguilera A. y Garzza Y. (2004). *Influencia de la concentración de iones sulfato en la Biotransformación anaerobia de DQO en un reactor piloto UASB*. Saltillo, México: Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo.
- Romo A. (2002). *Manual para el cultivo de microalgas*. La Paz, México: Universidad Autónoma de Baja California del Sur, Departamento de Biología Marina.
- Romo K. (2009). *Manual para el cultivo de microalgas*. La Paz, México: Universidad Autónoma de Baja California Sur.

- Sacher W. y Acosta A. (2012). *La minería a gran escala en el Ecuador, análisis y datos estadísticos sobre la minería en el Ecuador*. (1ª edición). Quito, Ecuador: Abya-Yala.
- Salazar M. (2005). *Aplicación e Importancia de las Microalgas en el Tratamiento de aguas residuales*. México D.F, México: Universidad Autónoma Metropolitana, Laboratorio de Microbiología Ambiental y tratamiento de aguas residuales.
- Secretaria Nacional del Agua SENAGUA (2010). *Línea base para el monitoreo de la calidad de agua dulce en cuerpos hídricos en la demarcación hidrográfica de la costa ecuatoriana*. Recuperado el 14 de Enero de 2015 de <http://www.agua.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2010/07/LineaBaseDHG.pdf>
- Soto H. (2013). *Potencial recuperación de mercurio en el proceso de extracción de oro*. San Marcos, Guatemala: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad De Química E Ingeniería Química.
- Spoolman S. y Miller T. (2013) *Living in the environment*. (18th Revised edition). Colorado, Estados Unidos: Brooks/Cole.
- Talano, M., González P. y Paisio C. (2012). *Remediación biológica de Mercurio: Recientes avances*. Revista Latinoamericana Biotecnología Ambiental Algal. Volúmen 3 (2ª edición). Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Texto Unificado Legislación Secundaria, Medio Ambiente, (TULSMA). LIBRO VI: de la Calidad Ambiental. Acuerdo Ministerial 097A, publicada en el Registro Oficial Suplemento 30 de julio.-2015.
- Torrentera y Tacón (1999). *La producción de alimento vivo y su importancia en acuicultura. Una diagnosis*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO: Brasilia, Brasil.
- Torres I. (2014). *Implicaciones para el caso ecuatoriano derivadas de los casos de minería responsable a nivel internacional*. Quito, Ecuador: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

- Valls, M. y de Lorenzo V. (2002). *Exploiting the genetic and the biochemical capacities of bacteria for the remediation of heavy metal pollution*. FEMS Microbiology Reviews Vol. 26. Madrid España: Centro Nacional de Biotecnología CSIC.
- Veiga M., Metcalf S., Baker F., Klein B., Davis G., Bamber A., Siegel S. y Singo P. (2010). *Manual for Training Artisanal and Small-Scale Gold Miners*. Montreal, Canada: Université de Montréal.
- Veiga M., Velásquez P. y Hall K. (2010). *Mercury balance in amalgamation in artisanal and small-scale gold mining: identifying strategies for reducing environmental pollution in Portovelo-Zaruma, Ecuador*. Vancouver, Canadá: University of British Columbia, Norman B. Keevil Institute of Mining Engineering.
- Vilchéz R. (2005) *Eliminación de metales pesados de aguas subterráneas mediante sistemas de lechos sumergidos: Estudio microbiológico de las biopelículas*. Granada, España: Instituto del agua.
- Virginia R. (2010), *Infraestructura sustentable: las plantas de tratamiento de aguas residuales*, Universidad Autónoma del Estado de México. Quivera, vol. 12, (2ª edición). Quievera, México.
- Volesky, B. (2011). *Detoxification of metal-bearing effluents: biosorption for the next century*. Hydrometallurgy.
- Volesky B., Weber J. y Park J. (2003). *Continuous-flow metal biosorption in regenerable Sargassum column*. Water Research, volumen 37 (2ª edición).
- Vullo D. (2003). *Microorganismos y metales pesados: Una interacción en beneficio del Medio Ambiente*. Química Viva. Universidad de Buenos Aires.
- Wang J. y Chen C. (2009). *Biosorbents for heavy metals removal and their future*. *Biotechnology Advances*. Volumen 27 (2ª edición).

## **6. ANEXOS**

## Anexo 1. Diagrama para la preparación de muestras.

Sulfatos		Fosfatos	
<p><b>Sulfat 1000</b> Sulphate/Sulfate/Sulfato</p> <p>Rundkvettest/ Tube test Test en cuves rondes/Prueba en cubeta cilíndrica</p> <p>200 1000 mg/L SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></p>  <p>1.0 mL Probe Sample Echantillon Muestra</p>  <p>Schütteln Shake Agiter Agitar</p>  <p>Nullwert Blank value Zéro Cero</p>  <p>1 x R2</p>  <p>10 s Schütteln Shake Agiter Agitar</p>  <p>Säubern Clean Nettoyer Limpiar</p>  <p>2 00 min</p>  <p>Messung Measurement Mesure Medición</p>		<p><b>NANOCOLOR® gesamt-Phosphat 15/Phosphate/Fosfato</b></p> <p>Method(e): 0801 0802 0803 0.80 15.00 mg/L P 1.0 45.0 mg/L PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 0.7 34.5 mg/L P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></p> <p>20-80 %: 0.80 3.24 12.06 15.00 mg/L P 1.0 3.8 36.2 45.0 mg/L PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></p> <p>REF 985 080</p>  <p>500 µL pH 9-10 Probe / Sample Echant. / Muestra</p>  <p>1 x NANOFIX R2</p>  <p>Schütteln / Shake Agiter / Agitar</p>  <p>120 °C / 30 min 100 °C / 1 h</p>  <p>Abkühlen / Cool Refroidir / Enfrío</p>  <p>1 x NANOFIX R3</p>  <p>200 µL R4</p>  <p>Schütteln / Shake Agiter / Agitar</p>  <p>Säubern / Clean Nettoyer / Limpiar</p>  <p>890 nm Messung / Measure Mesurer / Medir</p> <p>A03-100-485-900/05-030</p>	
Nitratos			
<p><b>NANOCOLOR® Nitrat 50/Nitrate/Nitrato</b></p> <p>Method(e): 0641 0642 0.3-22.0 mg/L NO<sub>3</sub>-N 2-100 mg/L NO<sub>3</sub><sup>-</sup></p> <p>20-80 %: 0.3 4.6 17.7 22.0 mg/L NO<sub>3</sub>-N 2 22 80 100 mg/L NO<sub>3</sub><sup>-</sup></p> <p>REF 985 064</p>  <p>500 µL pH 1-13 Probe / Sample Echant. / Muestra</p>  <p>500 µL R2</p>  <p>Schwenken / Invert Brandir / Ondear</p>  <p>Säubern / Clean Nettoyer / Limpiar</p>  <p>10'00 min</p>  <p>365 nm Messen / Measure Mesurer / Medir</p> <p>A037172 / 985 064 / 08125</p>			

**Anexo 2.** Composición de los medios empleados para la etapa de cultivo de las cepas de microalgas.

**Medio BG-11 (RippKa *et al.*, 1979)**

<i>Component</i>	<i>Stock Solution (g · L<sup>-1</sup> dH<sub>2</sub>O)</i>	<i>Quantity Used</i>	<i>Concentration in Final Medium (M)</i>
<i>Fe Citrate solution</i>		1 mL	
Citric acid	6	1 mL	$3.12 \times 10^{-5}$
Ferric ammonium citrate	6	1 mL	$\sim 3 \times 10^{-5}$
NaNO <sub>3</sub>	—	1.5 g	$1.76 \times 10^{-2}$
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> · 3H <sub>2</sub> O	40	1 mL	$1.75 \times 10^{-4}$
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	75	1 mL	$3.04 \times 10^{-4}$
CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	36	1 mL	$2.45 \times 10^{-4}$
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	20	1 mL	$1.89 \times 10^{-4}$
MgNa <sub>2</sub> EDTA · H <sub>2</sub> O	1.0	1 mL	$2.79 \times 10^{-6}$
Trace metals solution	(See following recipe)	1 mL	—

**Medio Bold Basal (Bold 1949, Bischoff and Bold 1963)**

<i>Component</i>	<i>Stock Solution (g · L<sup>-1</sup> dH<sub>2</sub>O)</i>	<i>Quantity Used</i>	<i>Concentration in Final Medium (M)</i>
<i>Macronutrients</i>			
NaNO <sub>3</sub>	25.00	10 mL	$2.94 \times 10^{-3}$
CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	2.50	10 mL	$1.70 \times 10^{-4}$
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	7.50	10 mL	$3.04 \times 10^{-4}$
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	7.50	10 mL	$4.31 \times 10^{-4}$
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	17.50	10 mL	$1.29 \times 10^{-3}$
NaCl	2.50	10 mL	$4.28 \times 10^{-4}$
<i>Alkaline EDTA Solution</i>		1 mL	
EDTA	50.00		$1.71 \times 10^{-4}$
KOH	31.00		$5.53 \times 10^{-4}$
<i>Acidified Iron Solution</i>		1 mL	
FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	4.98		$1.79 \times 10^{-5}$
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		1 mL	
<i>Boron Solution</i>		1 mL	
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	11.42		$1.85 \times 10^{-4}$
<i>Trace Metals Solution</i>		1 mL	
ZnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	8.82		$3.07 \times 10^{-5}$
MnCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	1.44		$7.28 \times 10^{-6}$
MoO <sub>3</sub>	0.71		$4.93 \times 10^{-6}$
CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	1.57		$6.29 \times 10^{-6}$
Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	0.49		$1.68 \times 10^{-6}$

**Medio Chu #10 Medium (Chu 1942)**

<i>Component</i>	<i>Stock Solution (g · L<sup>-1</sup> dH<sub>2</sub>O)</i>	<i>Quantity Used</i>	<i>Concentration in Final Medium (M)</i>
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	40.0	1 mL	$2.44 \times 10^{-4}$
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	5.0	1 mL	$2.87 \times 10^{-5}$
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	25.0	1 mL	$1.01 \times 10^{-4}$
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	20.0	1 mL	$1.89 \times 10^{-4}$
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	25.0	1 mL	$2.05 \times 10^{-4}$
FeCl <sub>3</sub>	0.8	1 mL	$4.93 \times 10^{-6}$

### Anexo 3. Resultados de los análisis de mercurio.

Concentración inicial de mercurio en el agua residual colectada.



**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS**

**LABORATORIO DE QUIMICA AMBIENTAL**  
**INFORME DE RESULTADOS**

**INF-LAB-QAM-39011**  
**ORDEN DE TRABAJO No 506JJ**

SOLICITADO POR: CIE  
DIRECCIÓN: REPUBLICA DEL SALVADOR N35-33 Y PORTUGAL  
FECHA DE RECEPCIÓN: 18/09/15  
HORA DE RECEPCION: 11H26  
MUESTRA DE: AGUA  
DESCRIPCION: AGUA (D)  
FECHA DE ANALISIS: DEL 18/09/2015 AL 28/09/2015  
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARIA: 29/09/15  
CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS: TURBIA  
ESTADO: LIQUIDO  
CONTENIDO: 400ml  
MUESTREADO POR: CLIENTE  
OBSERVACIONES: Los resultados que constan en el presente informe se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregada al OSP.

**INFORME**

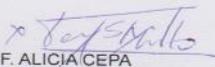
PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	MÉTODO
MERCURIO	mg/l	0.0074	MAM-50/APHA 3112 B MODIFICADO



Servicio de Acreditación Ecuatoriano  
**Acreditación N° OAE LE 1C 04-002, LABORATORIO DE ENSAYOS**

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



\*   
**B.F. ALICIA CEPA**  
**JEFE AREA DE AMBIENTAL**

ANEXO: LISTA DE INCERTIDUMBRES



Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gatto Sobral - Teléfonos: ~~2501-261-04~~ 502-456, ext. 15, 18, 21, 31, 33  
Telefax: 3216-740 - Web: www.facquimuce.edu.ec - E-mail: laboratoriososp@hotmail.com

## Tratamiento 1. *Pleurococcus* sp. caracterización final de mercurio



**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS**

**LABORATORIO DE QUIMICA AMBIENTAL**  
**INFORME DE RESULTADOS**

**INF-LAB-QAM-39008**  
**ORDEN DE TRABAJO No 50630**

SOLICITADO POR: CIE  
DIRECCIÓN: REPUBLICA DEL SALVADOR N35-33 Y PORTUGAL  
FECHA DE RECEPCIÓN: 18/09/15  
HORA DE RECEPCION: 11H26  
MUESTRA DE: AGUA  
DESCRIPCION: AGUA TRATADA  
FECHA DE ANALISIS: DEL 18/09/2015 AL 28/09/2015  
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARIA: 29/09/15  
CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS: TURBIA  
ESTADO: LIQUIDO  
CONTENIDO: 400ml  
MUESTREO POR: CLIENTE  
OBSERVACIONES: Los resultados que constan en el presente informe se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregada al OSP.

**INFORME**

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	MÉTODO
MERCURIO	mg/l	<0.0002	MAM-50/APHA 3112 B MODIFICADO



Servicio de Acreditación Ecuatoriano

**Acreditación N° OAE LE 1C 04-002, LABORATORIO DE ENSAYOS**

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



ANEXO: LISTA DE INCERTIDUMBRE



B.F. ALICIA CEPÁ  
**JEFE AREA DE AMBIENTAL**



**RAM-4.1-04**

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gatto Sobral - Teléfonos: 2502-2027/ 2502-456, ext. 15, 18, 21, 31, 33  
Telefax: 3216-740 - Web: www.facuquimuce.edu.ec - E-mail: laboratoriososp@hotmail.com

## Réplica 2 caracterización final de mercurio *Pleurococcus* sp.



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS

LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL  
INFORME DE RESULTADOS

INF-LAB-QAM-39116  
ORDEN DE TRABAJO No 50830

SOLICITADO POR:	CIE
DIRECCIÓN:	REPUBLICA DEL SALVADOR N35-33 Y PORTUGAL
FECHA DE RECEPCIÓN:	07/10/15
HORA DE RECEPCIÓN:	11H59
MUESTRA DE:	AGUA
DESCRIPCIÓN:	AGUA TRATADA
FECHA DE ANÁLISIS:	DEL 05/10/2015 AL 07/10/2015
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARÍA:	07/10/15
CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS:	TRANSPARENTE
ESTADO:	LIQUIDO
CONTENIDO:	400ml
MUESTREADO POR:	CLIENTE
OBSERVACIONES:	Los resultados que constan en el presente informe se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregada al OSP.

### INFORME

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	MÉTODO
MERCURIO	mg/l	0.0009	MAM-50/APHA 3112 B MODIFICADO



Servicio de  
Acreditación  
Ecuatoriano

Acreditación N° OAE LE 1C 04-002, LABORATORIO DE ENSAYOS

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

B.F. ALICIA CEPA  
JEFE AREA DE AMBIENTAL



ANEXO: LISTA DE INCERTIDUMBRE



Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gatto Sobral - Teléfonos: 2502-262 / 2502-456, ext. 15, 18, 21, 31, 33  
Telefax: 3216-740 - Web: www.facquimuce.edu.ec - E-mail: laboratoriososp@hatmail.com

RAM-4.1-04

### Réplica 3 caracterización final de mercurio *Pleurococcus* sp.



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS

LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL  
INFORME DE RESULTADOS

INF-LAB-QAM-39113  
ORDEN DE TRABAJO No 50830

SOLICITADO POR:	CII:
DIRECCIÓN:	REPUBLICA DEL SALVADOR N35-33 Y PORTUGAL
FECHA DE RECEPCIÓN:	07/10/15
HORA DE RECEPCIÓN:	11H59
MUESTRA DE:	AGUA
DESCRIPCIÓN:	AGUA TRATADA
FECHA DE ANÁLISIS:	DEL 05/10/2015 AL 07/10/2015
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARÍA:	07/10/15
CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS:	TRANSPARENTE
ESTADO:	LIQUIDO
CONTENIDO:	400ml
MUESTREADO POR:	CLIENTE
OBSERVACIONES:	Los resultados que constan en el presente informe se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregada al OSP.

#### INFORME

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	MÉTODO
MERCURIO	mg/l	0.001	MAM-50/APHA 3112 B MODIFICADO



Servicio de  
Acreditación  
Ecuatoriano

Acreditación N° OAE LE 1C 04-002, LABORATORIO DE ENSAYOS

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

  
B.F. ALICIA CEPA  
JEFE AREA DE AMBIENTAL

ANEXO: LISTA DE INCERTIDUMBRE



Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gatto Sobral - Teléfonos: 2502-202 / 2502-456, ext. 15, 18, 21, 31, 33  
Telefax: 3216-740 - Web: [www.facuquimuce.edu.ec](http://www.facuquimuce.edu.ec) - E-mail: [laboratoriososp@hotmail.com](mailto:laboratoriososp@hotmail.com)

RAM-41-04

## Tratamiento 2. Caracterización final de mercurio *Chlorella* sp.



**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS**

**LABORATORIO DE QUIMICA AMBIENTAL**  
**INFORME DE RESULTADOS**

**INF-LAB-QAM-39005**  
**ORDEN DE TRABAJO No 50631**

SOLICITADO POR:	CIE
DIRECCIÓN:	REPUBLICA DEL SALVADOR N35-33 Y PORTUGAL
FECHA DE RECEPCIÓN:	11/09/15
HORA DE RECEPCION:	09H31
MUESTRA DE:	AGUA
DESCRIPCION:	AGUA TRATADA
FECHA DE ANALISIS:	DEL 18/09/2015 AL 28/09/2015
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARIA:	29/09/2015
CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS:	TRANSPARENTE
ESTADO:	LIQUIDO
CONTENIDO:	400ml
MUESTREADO POR:	CLIENTE
OBSERVACIONES:	Los resultados que constan en el presente informe se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregada al OSP.

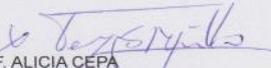
**INFORME**

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	MÉTODO
MERCURIO	mg/l	0.0010	MAM-50/APHA 3112 B MODIFICADO



Servicio de Acreditación Ecuatoriano  
**Acreditación N° OAE LE 1C 04-002, LABORATORIO DE ENSAYOS**

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



**B.F. ALICIA CEPA**  
**JEFE AREA DE AMBIENTAL**

ANEXO: LISTA DE INCERIDUMBRE





**BAM-4-1-04**

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gatto Sobral - Teléfonos: 2502-2827, 2502-456, ext. 15, 18, 21, 31, 33  
 Telefax: 3216 740 - Web: [www.facquimuce.edu.ec](http://www.facquimuce.edu.ec) - E-mail: [laboratoriososp@hotmail.com](mailto:laboratoriososp@hotmail.com)

## Réplica 2. Caracterización final de mercurio *Chlorella* sp.



**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS**

**LABORATORIO DE QUIMICA AMBIENTAL**  
**INFORME DE RESULTADOS**

**INF-LAB-QAM-39114**  
**ORDEN DE TRABAJO No 50830**

SOLICITADO POR:	CIE
DIRECCIÓN:	REPUBLICA DEL SALVADOR N35-33 Y PORTUGAL
FECHA DE RECEPCIÓN:	07/10/15
HORA DE RECEPCION:	11H59
MUESTRA DE:	AGUA
DESCRIPCION:	AGUA TRATADA
FECHA DE ANALISIS:	DEL 05/10/2015 AL 07/10/2015
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARIA:	07/10/15
CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS:	TRANSPARENTE
ESTADO:	LIQUIDO
CONTENIDO:	400ml
MUESTREADO POR:	CLIENTE
OBSERVACIONES:	Los resultados que constan en el presente informe se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregada al OSP.

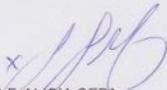
**INFORME**

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	MÉTODO
MERCURIO	mg/l	0.0013	MAM-50/APHA 3112 B MODIFICADO



Servicio de Acreditación Ecuatoriano  
**Acreditación N° OAE LE 1C 04-002. LABORATORIO DE ENSAYOS**

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



B.F. ALICIA CEPA  
**JEFE AREA DE AMBIENTAL**



**ANEXO: LISTA DE INCERTIDUMBRE**



**RAM-4.1-04**

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gatto Sobral - Teléfonos: 2502-262 / 2502-456, ext. 15, 18, 21, 31, 33  
 Telefax: 3216-740 - Web: [www.facquimuce.edu.ec](http://www.facquimuce.edu.ec) - E-mail: [laboratoriososp@hotmail.com](mailto:laboratoriososp@hotmail.com)

### Réplica 3. Caracterización final de mercurio *Chlorella* sp.



**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS**

**LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL**  
**INFORME DE RESULTADOS**

INF-LAB-QAM-39110  
 ORDEN DE TRABAJO No 50830

SOLICITADO POR:	CIE
DIRECCIÓN:	REPUBLICA DEL SALVADOR N35-33 Y PORTUGAL
FECHA DE RECEPCIÓN:	07/10/15
HORA DE RECEPCION:	11H59
MUESTRA DE:	AGUA
DESCRIPCION:	AGUA TRATADA
FECHA DE ANALISIS:	DEL 05/10/2015 AL 07/10/2015
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARIA:	07/10/15
CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS:	TRANSPARENTE
ESTADO:	LIQUIDO
CONTENIDO:	400ml
MUESTREADO POR:	CLIENTE
OBSERVACIONES:	Los resultados que constan en el presente informe se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregada al OSP.

**INFORME**

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	MÉTODO
MERCURIO	mg/l	0.0014	MAM-50/APHA 3112 B MODIFICADO



Servicio de Acreditación Ecuatoriano  
 Acreditación N° OAE LE 1C 04-002, LABORATORIO DE ENSAYOS

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



B.F. ALICIA CEPA  
 JEFE AREA DE AMBIENTAL



ANEXO: LISTA DE INCERTIDUMBRE



**RAM-41-04**  
 Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gatto Sobral - Teléfonos: 2502-2027 / 2502-456, ext. 15, 18, 21, 31, 33  
 Telefax: 3216-740 - Web: [www.facquimuce.edu.ec](http://www.facquimuce.edu.ec) - E-mail: [laboratoriososp@hotmail.com](mailto:laboratoriososp@hotmail.com)

### Tratamiento 3. Caracterización final de mercurio *Scenedesmus* sp.



**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS**

**LABORATORIO DE QUIMICA AMBIENTAL**  
**INFORME DE RESULTADOS**

**INF-LAB-QAM-39006**  
**ORDEN DE TRABAJO No 50631**

SOLICITADO POR:	CIE
DIRECCIÓN:	REPUBLICA DEL SALVADOR N35-33 Y PORTUGAL
FECHA DE RECEPCIÓN:	11/09/15
HORA DE RECEPCION:	09H31
MUESTRA DE:	AGUA
DESCRIPCIÓN:	AGUA TRATADA
FECHA DE ANALISIS:	DEL 18/09/2015 AL 28/09/2015
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARIA:	29/09/2015
CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS:	TRANSPARENTE
ESTADO:	LIQUIDO
CONTENIDO:	400ml
MUESTREO POR:	CLIENTE
OBSERVACIONES:	Los resultados que constan en el presente informe se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregada al OSP.

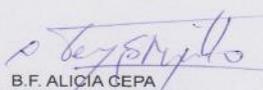
**INFORME**

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	MÉTODO
MERCURIO	mg/l	0.0020	MAM-50/APHA 3112 B MODIFICADO



Servicio de Acreditación Ecuatoriano  
**Acreditación N° OAE LE 1C 04-002, LABORATORIO DE ENSAYOS**

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



**B.F. ALICIA CEPÁ**  
**JEFE AREA DE AMBIENTAL**

ANEXO: LISTA DE INCERTIDUMBRE





**RAM-41-04**

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gatto Sobral - Teléfonos: 2302-262-2302-456, ext. 15, 18, 21, 31, 33  
 Telefax: 3216-740 - Web: [www.facquimuce.edu.ec](http://www.facquimuce.edu.ec) - E-mail: [laboratoriososp@hotmail.com](mailto:laboratoriososp@hotmail.com)

## Réplica 2. Caracterización final de mercurio *Scenedesmus* sp.



**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS**

**LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL**  
**INFORME DE RESULTADOS**

**INF-LAB-QAM-39115**  
**ORDEN DE TRABAJO No 50830**

SOLICITADO POR: CIE  
DIRECCIÓN: REPUBLICA DEL SALVADOR N35-33 Y PORTUGAL  
FECHA DE RECEPCIÓN: 07/10/15  
HORA DE RECEPCION: 111159  
MUESTRA DE: AGUA  
DESCRIPCION: AGUA TRATADA  
FECHA DE ANALISIS: DEL 05/10/2015 AL 07/10/2015  
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARIA: 07/10/15  
CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS: TRANSPARENTE  
ESTADO: LIQUIDO  
CONTENIDO: 400ml  
MUESTREADO POR: CLIENTE  
OBSERVACIONES: Los resultados que constan en el presente informe se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregada al OSP.

**INFORME**

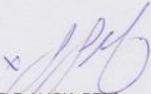
PARAMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	MÉTODO
MERCURIO	mg/l	0.0021	MAM-50/APHA 3112 B MODIFICADO



Servicio de  
Acreditación  
Ecuatoriano

**Acreditación N° OAE LE 1C 04-002. LABORATORIO DE ENSAYOS**

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



**B.F. ALICIA CEPA**  
**JEFE AREA DE AMBIENTAL**



ANEXO: LISTA DE INCERTIDUMBRE



**RAM-4.1-04**

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gatto Sobral - Teléfonos: 2502-262 / 2502-456, ext. 15, 18, 21, 31, 33  
Telefax: 3216-740 - Web: [www.facquimuce.edu.ec](http://www.facquimuce.edu.ec) - E-mail: [laboratoriososp@hotmail.com](mailto:laboratoriososp@hotmail.com)

### Réplica 3. Caracterización final de mercurio *Scenedesmus* sp.



**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS**

**LABORATORIO DE QUIMICA AMBIENTAL**  
**INFORME DE RESULTADOS**

**INF-LAB-QAM-39111**  
**ORDEN DE TRABAJO No 50830**

SOLICITADO POR:	CIE
DIRECCIÓN:	REPUBLICA DEL SALVADOR N35-33 Y PORTUGAL
FECHA DE RECEPCIÓN:	07/10/15
HORA DE RECEPCION:	11H59
MUESTRA DE:	AGUA
DESCRIPCION:	AGUA TRATADA
FECHA DE ANALISIS:	DEL 05/10/2015 AL 07/10/2015
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARIA:	07/10/15
CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS:	TRANSPARENTE
ESTADO:	LIQUIDO
CONTENIDO:	400ml
MUESTREADO POR:	CLIENTE
OBSERVACIONES:	Los resultados que constan en el presente informe se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregada al OSP.

**INFORME**

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	MÉTODO
MERCURIO	mg/l	0.0019	MAM-50/APHA 3112 B MODIFICADO



Servicio de Acreditación Ecuatoriana

**Acreditación N° OAE LE 1C 04-002, LABORATORIO DE ENSAYOS**

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



B.F. ALICIA CEPA  
JEFE AREA DE AMBIENTAL



ANEXO: LISTA DE INCERTIDUMBRE



**RAM-4.1-04**

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gatto Sobral - Teléfonos: 2502-2827 / 2502-456, ext. 15, 18, 21, 31, 33  
 Telefax: 3216-740 - Web: www.facquimuce.edu.ec - E-mail: laboratoriososp@hotmail.com

## Tratamiento 4. Caracterización final de mercurio del Consorcio.



**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS**

**LABORATORIO DE QUIMICA AMBIENTAL**  
**INFORME DE RESULTADOS**

INF-LAB-QAM-39007  
 ORDEN DE TRABAJO No 50631

SOLICITADO POR:	CIE
DIRECCIÓN:	REPUBLICA DEL SALVADOR N35-33 Y PORTUGAL
FECHA DE RECEPCIÓN:	11/09/15
HORA DE RECEPCION:	09H31
MUESTRA DE:	AGUA
DESCRIPCION:	AGUA TRATADA
FECHA DE ANALISIS:	DEL 18/09/2015 AL 28/09/2015
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARIA:	29/09/20415
CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS:	TRANSPA
ESTADO:	LIQUIDO
CONTENIDO:	400ml
MUESTREO POR:	CLIENTE
OBSERVACIONES:	Los resultados que constan en el presente informe se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregada al OSP.

**INFORME**

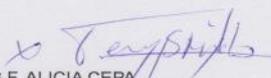
PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	MÉTODO
MERCURIO	mg/l	0.0011	MAM-50/APHA 3112 B MODIFICADO



Servicio de Acreditación Ecuatoriano  
**Acreditación N° OAE LE 1C 04-002. LABORATORIO DE ENSAYOS**

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



  
**B.F. ALICIA CEPA**  
**JEFE AREA DE AMBIENTAL**

ANEXO: LISTA DE INCERTIDUMBRES



**FAM-4-1-04**  
 Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gatto Sobral - Teléfonos: 2502-2927, 2902-456, ext. 15, 18, 21, 31, 33  
 Telefax: 3216-740 - Web: [www.facquimuce.edu.ec](http://www.facquimuce.edu.ec) - E-mail: [laboratoriososp@hotmail.com](mailto:laboratoriososp@hotmail.com)

## Réplica 2. Caracterización final de mercurio del Consorcio.



**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS**

**LABORATORIO DE QUIMICA AMBIENTAL**  
**INFORME DE RESULTADOS**

**INF-LAB-QAM-39109**  
**ORDEN DE TRABAJO No 50830**

SOLICITADO POR:	CIE
DIRECCIÓN:	REPUBLICA DEL SALVADOR N35-33 Y PORTUGAL
FECHA DE RECEPCIÓN:	07/10/15
HORA DE RECEPCION:	11H59
MUESTRA DE:	AGUA
DESCRIPCION:	AGUA TRATADA.
FECHA DE ANALISIS:	DEL 05/10/2015 AL 07/10/2015
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARIA:	07/10/15
CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS:	TRANSPARENTE
ESTADO:	LIQUIDO
CONTENIDO:	400ml
MUESTREADO POR:	CLIENTE
OBSERVACIONES:	Los resultados que constan en el presente informe se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregada al OSP.

**INFORME**

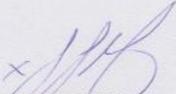
PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	MÉTODO
MERCURIO	mg/l	0.0011	MAM-50/APIIA 3112 B MODIFICADO



Servicio de Acreditación Ecuatoriano

Acreditación N° OAE LE 1C 04-002, LABORATORIO DE ENSAYOS

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



B.F. ALICIA CEPÁ  
JEFE AREA DE AMBIENTAL



ANEXO: LISTA DE INCERTIDUMBRE



**RAM-4.1-04**

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gatto Sobral - Teléfonos: 2502-262 / 2502-456, ext. 15, 18, 21, 31, 33  
 Telefax: 3216-740 - Web: [www.facquimuce.edu.ec](http://www.facquimuce.edu.ec) - E-mail: [laboratoriososp@hotmail.com](mailto:laboratoriososp@hotmail.com)

### Réplica 3. Caracterización final de mercurio del Consorcio.



**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS**

**LABORATORIO DE QUIMICA AMBIENTAL**  
**INFORME DE RESULTADOS**

**INF-LAB-QAM-39112**  
**ORDEN DE TRABAJO No 50830**

SOLICITADO POR:	CIE
DIRECCIÓN:	REPUBLICA DEL SALVADOR N35-33 Y PORTUGAL
FECHA DE RECEPCIÓN:	07/10/15
HORA DE RECEPCION:	11H59
MUESTRA DE:	AGUA
DESCRIPCION:	AGUA TRATADA
FECHA DE ANALISIS:	DEL 05/10/2015 AL 07/10/2015
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARIA:	07/10/15
CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS:	TRANSPARENTE
ESTADO:	LIQUIDO
CONTENIDO:	400ml
MUESTREADO POR:	CLIENTE
OBSERVACIONES:	Los resultados que constan en el presente informe se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregada al OSP.

**INFORME**

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	MÉTODO
MERCURIO	mg/l	0.0012	MAM-50/APHA 3112 B MODIFICADO



Servicio de Acreditación Ecuatoriano

Acreditación N° OAE LE 1C 04-002, LABORATORIO DE ENSAYOS

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



B.F. ALICIA CEPA  
JEFE AREA DE AMBIENTAL



ANEXO: LISTA DE INCERTIDUMBRE



**RAM-4.1-04**

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gatto Sobral - Teléfonos: 2502-2627 / 2502-456, ext. 15, 18, 21, 31, 33  
 Telefax: 3216-740 - Web: www.facquimuce.edu.ec - E-mail: laboratoriososp@hotmail.com

**Anexo 4.** TULSMA, libro VI, Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso agua, Tabla 12. "Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce"

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y Grasas.	Sustancias solubles en hexano	mg/l	0,3
Alkil mercurio		mg/l	No detectable
Aldehídos		mg/l	2,0
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico total	As	mg/l	0,1
Bario	Ba	mg/l	2,0
Boro total	B	mg/l	2,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro total	CN <sup>-</sup>	mg/l	0,1
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,5
Cloroformo	Extracto carbón cloroformo ECC	mg/l	0,1
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	mg/l	1 000
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Cobalto	Co	mg/l	0,5
Coliformes Fecales	Nmp/100 ml		<sup>1</sup> Remoción > al 99,9 %
Color real	Color real	unidades de color	* Inapreciable en dilución: 1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0,2
Cromo hexavalente	Cr <sup>+6</sup>	mg/l	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	D.B.O <sub>5</sub> .	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno	D.Q.O.	mg/l	250
Dicloroetileno	Dicloroetileno	mg/l	1,0
Estaño	Sn	mg/l	5,0
Fluoruros	F	mg/l	5,0
Fósforo Total	P	mg/l	10

<b>Parámetros</b>	<b>Expresado como</b>	<b>Unidad</b>	<b>Límite máximo permisible</b>
Hierro total	Fe	mg/l	10,0
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	20,0
Manganeso total	Mn	mg/l	2,0
Materia flotante	<b>Visibles</b>		<b>Ausencia</b>
Mercurio total	Hg	mg/l	0,005
Níquel	Ni	mg/l	2,0
Nitratos + Nitritos	Expresado como Nitrógeno (N)	mg/l	10,0

**Anexo 5. Registro fotográfico.**

	
<p>1. Especies en tubos de ensayos plásticos, creciendo en medio de cultivo (BG11, BB y CHU)</p>	<p>2. Escalamiento a 500 ml de las especies</p>
	
<p>3. Ensayos con el agua de río contaminada para determinar idoneidad de las especies.</p>	<p>4. Escalamiento 5 litros</p>



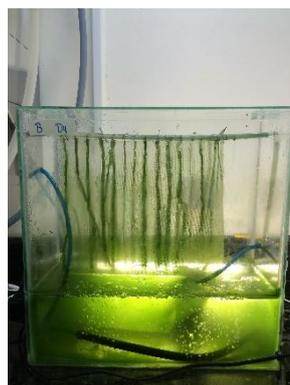
5. Materiales para la construcción de reactores con una capacidad de 5 litros cada uno, motores y bomba de recirculación.



6. Reactor armado donde se muestran sus partes, se inyecta el aire por debajo, la bomba recircula el agua para que caiga en forma de lluvia.



7. Reactores montados con el agua de río sin microalgas.



8. Reactor con agua de río contaminada y con microalgas para el proceso de biosorción.