

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA**



**DETERMINACIÓN DE: ARSÉNICO, CADMIO, MERCURIO Y PLOMO (As,  
Cd, Hg y Pb) EN COMPOST A BASE DE *Hydrilla verticillata* EN EL  
CANTÓN TZA'N KAQAJAAY DE SAN PEDRO LA LAGUNA,  
SOLOLÁ, GUATEMALA.**

**Presentado por  
AMPARO ALEJANDRA DÍAZ HERNÁNDEZ**

**Para optar al título de  
QUÍMICA**

**Guatemala, agosto 2021**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA

The seal of the University of San Carlos of Guatemala is a circular emblem. It features a central figure of a knight on a white horse, holding a lance. Above the knight is a golden crown with a cross on top. To the left and right of the crown are two golden lions rampant. Below the knight are two green mountains, one of which has a volcano with a white plume of smoke. The entire scene is set against a light blue background. The seal is surrounded by a grey border containing the Latin text "ACADEMIA COACTEMALENSIS INTER CÆTERAS ORBIS CONSPICUA CAROLINA".

**DETERMINACIÓN DE: ARSÉNICO, CADMIO, MERCURIO Y PLOMO (As, Cd, Hg y Pb) EN COMPOST A BASE DE *Hydrilla verticillata* EN EL CANTÓN TZA'N KAQAJAAY DE SAN PEDRO LA LAGUNA, SOLOLÁ, GUATEMALA.**

Presentado por  
**AMPARO ALEJANDRA DÍAZ HERNÁNDEZ**

Para optar al título de  
**QUÍMICA**

Guatemala, agosto 2021



**Guatemala, agosto 2021**

# UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



## FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA

### NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	M.A. Pablo Oliva Soto
SECRETARIA	Licda. Miriam Roxana Marroquín Levia
VOCAL I	Dr. Juan Francisco Pérez Sabino
VOCAL II	Dr. Roberto Enrique Flores Arzú
VOCAL III	Lic. Carlos Manuel Maldonado Aguilera
VOCAL IV	Br. Carmen Amalia Rodríguez Ortiz
VOCAL V	Br. Paola Margarita Gaitán Valladares

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que estuvieron presentes en mi formación profesional y a cada una de las instituciones que apoyaron y colaboraron en el proceso de este estudio. A todos gracias por concederme el honor de compartir este logro conmigo, principalmente a:

El pueblo de Guatemala, por su inversión económica en mis estudios y mis sueños.

A la Universidad de San Carlos de Guatemala, por ser mi Alma mater.

A la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia y a la Escuela de Química, por el conocimiento y experiencia adquirida.

Al personal docente y administrativo del Departamento de Química General, del Departamento de Análisis Inorgánico y a la Unidad de Análisis Instrumental por permitirme ser parte del equipo de trabajo y permitirme indagar más de cerca en la química y la docencia.

A todos mis profesores y auxiliares por ser mis guías en este camino. Especialmente a la Licda. Patricia Navas, por su motivación y disposición en esta etapa. A la Licda. Marta María del Cid, el Lic. Oswaldo Martínez y el Lic. Ricardo Véliz por sus aportes en la elaboración de este trabajo.

Al personal del Departamento de Investigación y Calidad Ambiental -DICA- de La Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán -AMSCLAE- por apoyar este proyecto desde sus inicios.

A la comunidad del Cantón Tza'ñ Kaqajaay, al Hotel Wachalal y a la Municipalidad de San Pedro la Laguna, Sololá, por el apoyo, las enseñanzas, las experiencias y por permitirme llevar un granito de arena a la comunidad.

Al programa EPSUM y al equipo EPSUM-AMSCLAE 2018-2019, Mónica Barillas, Edwin Cojón y Dandy Sandoval, por ser un gran equipo de trabajo y por todas las aventuras que pasamos para llevar a cabo este proyecto.

## **DEDICATORIA A:**

Mis padres, Julio Roberto Díaz Reyes y Flor de María Hernández López, por ser mis maestros de vida, por enseñarme con su ejemplo que con esfuerzo todo se puede lograr, que el límite de mis sueños tiende al infinito, que mi vida es finita y en la tierra persistirá solo lo que decida hacer con ella.

Mis hermanos, Gabriela y Roberto Díaz, por ser la “cuando sea grande quiero ser como ella” y el “quiero ser mejor persona para ser un buen ejemplo”, porque creer en mí, por todo lo que hemos vivido juntos, por apoyarme, entenderme y por todas las aventuras que nos esperan.

Toda mi familia, que no puedo pensar en ellos sin recordar muchas risas, viajes, aventuras y muchas caídas. Gracias por todo el apoyo.

Mi sobrino, Carlitos Ramírez, que es mi más grande maestro y compañero de aventuras. Gracias por hacer que vuele mi imaginación, que vuelva a ser niña y mostrarme la vida desde otra perspectiva, con una curiosidad y ganas de aprender que admiro.

Todos mis amigos, especialmente a Victor Orozco, Andrea Lavarreda y Alejandra Navarizo por acompañarme con tantas risas, experiencias, pláticas de todo un poco y también en los momentos más difíciles.

A mis compañeros de clase y de trabajo, Pedro Pablo Molina, Sergio Valdez, Janet Alvarado, Julio Santizo, Kitze Tzian, Jorge Solís, Rodrigo Wolford, Rony Letona, Fermin Labin, Yancy Juan, Sarai Toledo, Carlos Torres, por acompañarme y hacer este proceso mucho más bonito.

A todos los que sembraron en mí una espinita de curiosidad desde muy pequeña y los que me han guiado hasta ahora; profesores, alumnos, personas que han llegado y se han ido.

## INDICE

<b>1. RESUMEN</b> .....	1
<b>2. INTRODUCCIÓN</b> .....	2
<b>3. ANTECEDENTES</b> .....	4
<b>3.1. GUATEMALA</b> .....	4
3.1.1. GEOLOGÍA DE GUATEMALA.....	4
3.1.2. CLASIFICACIÓN FISIOGRÁFICA .....	6
<b>3.2. SOLOLÁ</b> .....	7
3.2.1. GEOLOGÍA DE SOLOLÁ.....	8
3.2.2. SUELO DE SOLOLÁ.....	9
3.2.2.1. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DE SUELO.....	10
3.2.2.2. MATERIALES GEOLÓGICOS IDENTIFICADOS .....	13
A. Pómez.....	15
B. Granito (Rocas graníticas) .....	15
C. Tobas.....	15
D. Sedimentos de relleno de calderas, sedimentos lacustres.....	15
E. Aluvión pómez .....	16
F. Domos volcánicos en dacita y riolita.....	16
G. Metasedimentos .....	16
H. Brechas intrusivas.....	16
I. Diques anulares félsicos .....	16
J. Carbonatos .....	17
K. Mineralogía de los materiales parentales .....	17
L. Mineralogía de suelos de moderada a baja evolución .....	17
M. Material Volcánico.....	18
<b>3.3. METALES EN EL LAGO DE ATITLÁN</b> .....	19
<b>3.4. METALES: EFECTOS EN LA SALUD Y AMBIENTE</b> .....	23
3.4.1. ARSÉNICO (As) .....	23
3.4.2. CADMIO (Cd) .....	24
3.4.3. MERCURIO (Hg).....	25
3.4.4. PLOMO (Pb).....	26
<b>3.5. FITORREMEDIACIÓN</b> .....	27
3.5.1. HIPERACUMULACIÓN.....	28
<b>3.6. <i>Hydrilla verticillata</i></b> .....	29
3.6.1. PROPIEDAD HIPERACUMULADORA DE <i>Hydrilla verticillata</i> .....	29
3.6.1.1. Arsénico (As).....	30
3.6.1.2. Cadmio (Cd) .....	31
3.6.1.3. Mercurio (Hg) .....	31
3.6.1.4. Plomo (Pb).....	31

<b>3.7.</b>	<b><i>Hydrilla verticillata</i> EN SAN PEDRO LA LAGUNA, SOLOLÁ</b> .....	31
3.7.1.	COMPOSTAJE .....	35
3.7.2.	MATERIAL COMPOSTABLE .....	39
3.7.3.	TÉCNICAS DE COMPOSTAJE .....	41
3.7.4.	ANÁLISIS DE INOCUIDAD DEL COMPOST .....	43
3.7.5.	NORMA NTC 5167 NORMA TÉCNICA COLOMBIANA.....	44
3.7.6.	NORMAS DEL CONSEJO CATALÁN DE LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA ECOLÓGICA CCPAE-, VERSIÓN 17-10-2003. ....	45
3.7.7.	ACUERDO GUBERNATIVO No. 236-2006 de la REPÚBLICA DE GUATEMALA.....	45
3.11.1.	<i>Hydrilla verticillata</i> COMO COMPOST .....	47
<b>4.</b>	<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	53
<b>5.</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	55
<b>6.</b>	<b>HIPÓTESIS</b> .....	55
<b>7.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	56
<b>8.</b>	<b>RECURSOS ECONÓMICOS E INSTITUCIONALES</b> .....	67
8.1.	Recursos Humanos .....	67
8.2.	Recursos Institucionales .....	67
8.3.	Recursos Económicos .....	67
<b>9.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	68
<b>10.</b>	<b>DISCUSIÓN</b> .....	77
10.1.	Arsénico (As) .....	77
10.2.	Cadmio (Cd) .....	78
10.3.	Mercurio (Hg) .....	79
10.4.	Plomo (Pb).....	80
10.5.	CARACTERIZACIÓN METÁLICA DE CADA COMPOST .....	83
10.6.	COSTO/BENEFICIO DE LA PRODUCCIÓN DE CADA COMPOST .....	84
<b>11.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	87
<b>12.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	89
<b>13.</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	90
<b>14.</b>	<b>ANEXOS</b> .....	101

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Ubicación de Guatemala en Mesoamérica y América.....	5
Figura 2.	Mapa fisiográfico-geomórfico de Guatemala.....	6
Figura 3.	Localización del departamento de Sololá.....	8
Figura 4.	Volcanes surgidos al sur del Lago de Atitlán.....	9
Figura 5.	Pirámide categórica del sistema norteamericano de clasificación de Suelos.....	10
Figura 6.	Mapa de clasificación de suelos a nivel de orden del departamento de Sololá.....	11
Figura 7.	Mapa de geología del departamento de Sololá.....	13
Figura 8.	Mapa isoquímico del ion arsénico en los nacimientos de la cuenca.....	22
Figura 9.	Extracción de <i>Hydrilla verticillata</i> en la playa del Cantón Tza'ín Kaqajaay.....	33
Figura 10.	Ciclo de Nutrientes en el ambiente.....	36
Figura 11.	Temperatura, oxígeno y pH en el proceso de compostaje.....	37
Figura 12.	Contenido de As (mg/Kg) a escala logarítmica en los seis prototipos de compost y comparación con las normas y acuerdo considerados.....	70
Figura 13.	Contenido de Cd (mg/Kg) a escala logarítmica en los seis prototipos de compost y comparación con las normas y acuerdo considerados.....	70
Figura 14.	Contenido de Hg (mg/Kg) a escala logarítmica en los seis prototipos de compost y comparación con las normas y acuerdo considerados.....	71
Figura 15.	Contenido de Pb (mg/Kg) a escala logarítmica en los seis prototipos de compost y comparación con las normas y acuerdo considerados.....	71
Figura 16.	Descripción de contenido de metales pesados en compost MO-E.....	72
Figura 17.	Descripción de contenido de metales pesados en compost MO-F.....	72
Figura 18.	Descripción de contenido de metales pesados en compost LC-E.....	73
Figura 19.	Descripción de contenido de metales pesados en compost LC-F.....	73
Figura 20.	Descripción de contenido de metales pesados en compost MM-E.....	74
Figura 21.	Descripción de contenido de metales pesados en compost MM-F.....	74

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Clasificación taxonómica de subgrupo de los suelos de Sololá.....	12
Tabla 2.	Leyenda integrada del mapa geológico escala 1:50,000 y 1:250,000.....	14
Tabla 3.	Promedio de composición mineralógica de la fracción arcilla de los suelos.....	17
Tabla 4.	Composición promedio de los minerales que componen los piroclastos...	17
Tabla 5.	Concentración de metales en plantas acuáticas y peces del lago de Atitlán.....	20
Tabla 6.	Parámetros del compostaje .....	38
Tabla 7.	Elementos esenciales para el desarrollo de las plantas, símbolos, formas de absorción y composición aproximada de las plantas.....	39
Tabla 8.	Contenido nutricional del material compostable.....	41
Tabla 9.	Límite máximo permisible de As, Cd, Hg y Pb según la Norma NTC 5167.....	44
Tabla 10.	Límite máximo permisible de Cd, Hg y Pb según las Normas del CCPAE	45
Tabla 11.	Límite máximo permisible de As, Cd, Hg y Pb el Acuerdo gubernativo No. 236-2006 de la República de Guatemala.....	46
Tabla 12.	Componentes de los 6 tipos de compost elaborados y analizados	48
Tabla 13.	Análisis fisicoquímico de los prototipos de compost a base de <i>Hydrilla verticillata</i> .....	49
Tabla 14.	Programa de Temperaturas .....	59
Tabla 15.	Preparación de curva de calibración de arsénico en absorción Atómica..	60
Tabla 16.	Preparación de curva de calibración de mercurio en absorción atómica...	62
Tabla 17.	Preparación de curva de calibración de cadmio en absorción atómica.....	63
Tabla 18.	Preparación de curva de calibración de plomo en absorción atómica.....	65
Tabla 19.	Datos de las seis muestras de compost a base de <i>Hydrilla verticillata</i> del cantón Tza'n Kaqajaay, San Pedro la Laguna, Sololá.....	68
Tabla 20.	Límites de detección (mg/Kg) de los metales analizados empleando el espectrómetro de absorción atómica.....	68
Tabla 21.	Disponibilidad de arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) en seis prototipos de compost a base de <i>Hydrilla verticillata</i> .....	68
Tabla 22.	Recopilación de normas y acuerdo sobre la disponibilidad aceptable de arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) presentes en un compost.....	69
Tabla 23.	Disponibilidad de arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) en seis prototipos de compost a base de <i>Hydrilla verticillata</i> multiplicados por 1000 en escala logarítmica.....	69
Tabla 24.	Recopilación de normas y acuerdo sobre la disponibilidad aceptable de arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) presentes en un compost, multiplicado por 1000 en escala logarítmica.....	69
Tabla 25.	<i>Costo/Beneficio de la producción de 100 t de compost MO-E y MO-F.....</i>	75
Tabla 26.	<i>Costo/Beneficio de la producción de 100 t de compost LC-E y LC-F.....</i>	75
Tabla 27.	<i>Costo/Beneficio de la producción de 100 t de compost MM-E y MM-F.....</i>	76

## 1. RESUMEN

El continuo crecimiento de la planta subacuática, *H. verticillata* ha tenido efectos negativos sobre la comunidad del cantón Tza'n Kaqajaay del municipio de San Pedro la Laguna, Sololá y su entorno, impactando a la biodiversidad, economía, salud y el ornato del lugar. Por esto, *H. verticillata* es retirada de las orillas de la playa y utilizada como materia prima para la elaboración de compost. Considerando los estudios sobre el contenido de metales en el Lago de Atitlán y la característica hiperacumuladora de metales de la *H. verticillata*, se llevó a cabo este estudio, en el que se determinaron los niveles de concentración de arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) en seis diferentes prototipos de compost hechos a base de *Hydrilla verticillata*, denominados por su composición como: MO-E, MO-F, LC-E, LC-F, MM-E y MM-F, para su uso en actividades agrícola. De los cuales cinco prototipos (MO-E, MO-F, LC-E, LC-F y MM-F) presentaron los cuatro metales estudiados (As, Cd, Hg y Pb); mientras que el compost MM-E evidenció tres metales disponibles (As, Cd y Pb).

Los niveles de concentración de arsénico (As) rondaron entre 0.723 mg/Kg y 0.955 mg/Kg. Los niveles de concentración de cadmio (Cd) entre 0.590 mg/Kg y 1.090 mg/Kg. La muestra con menor concentración de mercurio (Hg), presentó un valor por debajo del límite de detección (<0.0006 mg/Kg) y la muestra de mayor concentración tuvo un valor de 0.060 mg/Kg. La concentración de plomo (Pb) se encontró entre 6.540 mg/Kg y 20.540 mg/Kg. Indicando así, que el orden creciente de contenido de metales en los seis compost es: MM-F < MO-F < MM-E < MO-E < LC-F < LC-M. Además, estos datos evidencian que, los seis prototipos de compost hechos a base de *H. verticillata* presentaron valores menores a los establecidos por el acuerdo con la norma NTC 5167, la norma CCPAE versión 17-10-2003 y el Acuerdo gubernativo 236-2006 de la República de Guatemala. Esta última establece que, al ajustarse los compost a los límites máximos permisibles, se permite la aplicación de estos como abono en proporciones de hasta cien mil kilogramos por hectárea por año.

## 2. INTRODUCCIÓN

El Lago de Atitlán, se encuentra en medio de una zona montañosa y volcánica, originada por la convergencia de tres placas tectónicas: Cocos, Del Caribe y Norteamérica, en Guatemala. Es por esto que naturalmente, los suelos de la cuenca del Lago de Atitlán, contienen material volcánico asentado a través del tiempo, el cual es portador de diferentes metales. Sumado a esto, otra fuente de metales son las actividades antropológicas que se dan en la cuenca y los alrededores del lago. Tras distintas investigaciones realizadas sobre la presencia de metales pesados en el Lago de Atitlán, se ha identificado arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), mercurio (Hg), plomo (Pb), zinc (Zn), hierro (Fe), entre otros, lo cual puede afectar de diferentes formas a las poblaciones alrededor de la cuenca y el Lago.

Una de las plantas subacuáticas con mayor abundancia en el Lago de Atitlán es *Hydrilla verticillata*, que tiene propiedades hiperacumuladoras de metales, esto quiere decir que tiene la capacidad de absorber metales en su organismo (Dix, Fortin, & Medinilla, 2003). Se caracteriza también, por su alta capacidad metabólica de crecer y reproducirse, lo que le permite proliferarse, lo cual genera efectos negativos como el desplazamiento de especies nativas, la interferencia u obstrucción de las actividades antropogénicas como la pesca, transporte, recreación y turismo, impactando en la economía, la salud y el ornato.

Una de las comunidades afectadas es el cantón de Tza'n Kaqajaay, ubicado en el municipio de San Pedro la Laguna. Los fuertes vientos y el oleaje producidos en la zona, promueven la acumulación de grandes cantidades de esta planta en la playa. La comunidad se organiza para realizar extracciones de *H. verticillata*, generalmente sin tomar en cuenta técnicas de corte que ayuden a controlar su proliferación, agravando la situación. El material extraído es depositado en la orilla de la playa, en donde se descompone y se acumula sin tener una estrategia de aprovechamiento, generando lodos, mal olor, focos de contaminación, decaimiento del paisaje, problemas de transporte y actividades recreativas.

Con el fin de controlar la contaminación en las orillas de la playa, un pequeño porcentaje de este material es transportado a la planta de tratamiento de desechos sólidos de la municipalidad de San Pedro la Laguna y es utilizado para realizar compostaje. En 2018 se realizó un estudio sobre seis métodos de compostaje a base de *Hydrilla verticillata*, con el fin de encontrar el más eficiente y representativo para la producción de abono orgánico, y así, este pudiera ser distribuido a la población de San Pedro, o bien pudiera ser comercializado, teniendo como beneficios, la generación de empleo y un incremento económico a la comunidad (Díaz, Barillas, Sandoval, & Cojon, 2018).

Sin embargo, los resultados del análisis fisicoquímico de macronutrientes y micronutrientes mostraron alto contenido de metales, como sodio (Na), hierro (Fe) y manganeso (Mn), aportados por *H. verticillata*. Sabiendo que esta planta tiene la capacidad de acumular no solo los metales considerados como micronutrientes, si no también metales pesados y tomando en cuenta los estudios previos de la contaminación del Lago de Atitlán por metales pesados, de los cuales el arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) se encuentran con mayor concentración; en este trabajo se determinó la presencia de estos elementos en los seis prototipos de compost e identificó su cumplimiento con los requerimientos para el uso agrícola, comparando los datos con la norma NTC 5167 (Norma Técnica Colombiana) (ICONTEC, 2011), CCPAE (Normas del Consejo Catalán de la Producción Agraria Ecológica) (CCPAE, 2003) y el Acuerdo Gubernativo 236-2006 de la República de Guatemala (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2006), para que esta información pueda ser llevada a las autoridades encargadas del tratamiento de *H. verticillata* y puedan tomar las decisiones pertinentes a la problemática que se está abordando.

### **3. ANTECEDENTES**

#### **3.1. GUATEMALA**

Guatemala (del náhuatl Quauhtlemallan , “lugar de los árboles”), oficialmente República de Guatemala; ocupa el sector septentrional del istmo centroamericano, al sur del Trópico del Trópico de Cáncer en la franja tropical. Se sitúa entre los paralelos 13°30´ a 18°00´ norte y meridianos 88°00´ a 92°30´ oeste. La superficie territorial es de 108,889 km<sup>2</sup>. Sus límites están enmarcados al norte y oeste con México, al sur con el océano pacífico, al este con Belice y el Golfo de Honduras, al sureste con Honduras y El Salvador (MARN-URL/IARNA-PNUMA, 2009).

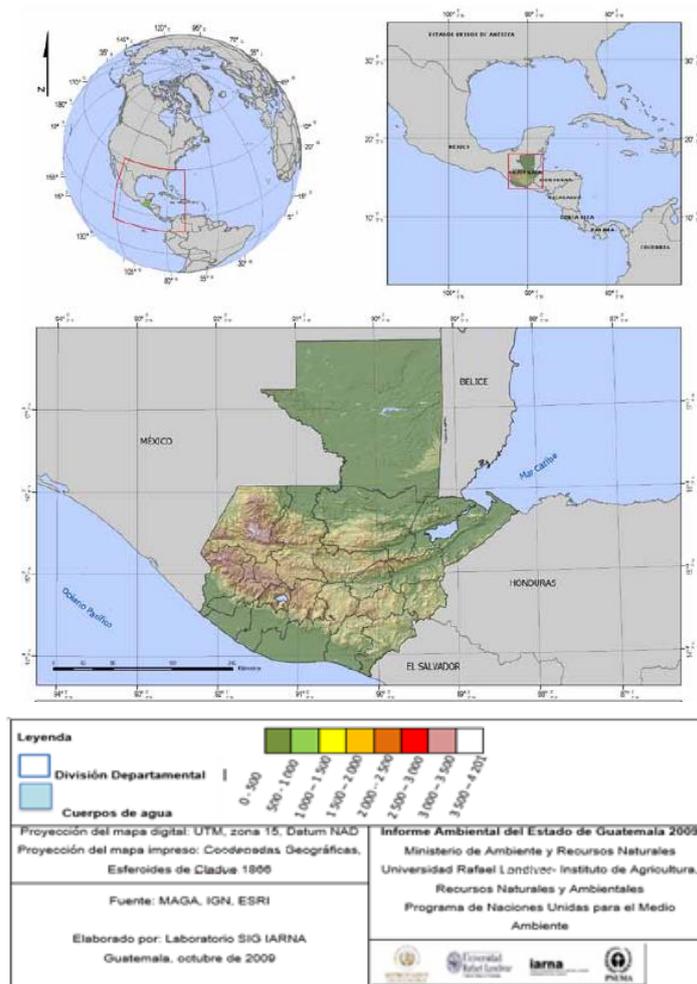
##### **3.1.1. GEOLOGÍA DE GUATEMALA**

La geología del país se explica a través del concepto de “tectónica de placas” ya que en este territorio confluyen 3 de las 15 placas existentes en el planeta: la Placa de Cocos, la Placa de Norteamérica y la Placa del Caribe (MAGA, 2013).

El movimiento de la placa tectónica del Caribe hacia el este con respecto a la placa norteamericana al final del período Cretácico, produjo un choque frontal entre terrenos con corteza continental en el límite entre ambas placas, originando cadenas montañosas (ITURRALDE-VINENT, 2006) y el relieve guatemalteco paralelo a la costa del Pacífico, que fue incrementando durante varios millones de años tras erupciones y emanaciones de material volcánico tipo pómez silíceo. Estas fisuras entre placas tectónicas fueron en conjunto, lo que permitió la diferenciación fisicoquímica de los magmas producidos por la subducción (MAGA, 2013). Explicando así, el origen volcánico de la mayoría de los suelos de la plataforma central de Guatemala y Centroamérica, y el poco desarrollo de los suelos de las partes planas del norte, como las regiones de Petén, Belice y Yucatán; es decir, los suelos de la plataforma central tienen varias decenas de millones de años de formación en los que han influido principalmente, la actividad volcánica, la flora, el clima y el tiempo. (Dengo, 1973).

La altitud de Guatemala varía desde el nivel del mar hasta 3,500 m, a excepción de picos volcánicos que sobrepasan los 4,000 m de altitud (MAGA, 2013). Siendo uno de los países más volcánicos del mundo. Por lo que los suelos muestran cambios drásticos de una región a otra debido a su origen geomorfológico: en la región del Atlántico la mayor parte de suelos son de origen sedimentario, mientras que en altiplano y la región sur son de origen volcánico (IGN, 1972).

*Figura 1. Ubicación de Guatemala en Mesoamérica y América*



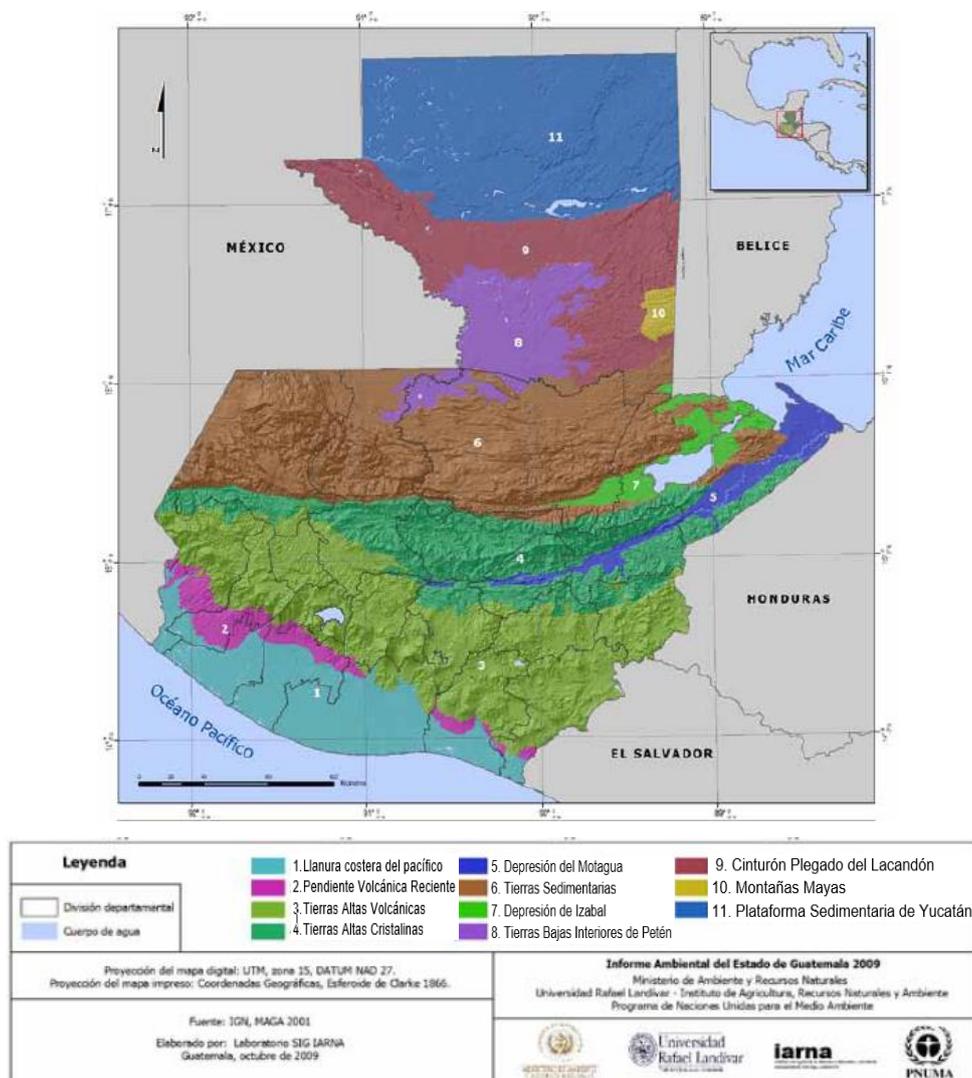
Fuente: (IARNA, 2009)

Los múltiples plegamientos geográficos provocan constantes sismos y erupciones volcánicas. Considerando la variación geológica, topográfica, edáfica (fisiográfica) y climática, sobre la influencia que generan estos componentes en la capacidad de uso de las tierras (MARN-URL/IARNA-PNUMA, 2009),

### 3.1.2. CLASIFICACIÓN FISIAGRÁFICA

Considerando las variaciones geológicas, topográficas, climáticas y edáficas (fisiográficas), sobre la influencia que generan estos componentes en la capacidad de uso de tierras, Guatemala se ha dividido en once regiones naturales, las cuales son: Llanura costera del pacífico, pendiente volcánica reciente, Tierras altas volcánicas, Tierras altas cristalinas, Depresión del Motagua, Tierras sedimentarias, Depresión de Izabal, Tierras bajas interiores de Petén, Cinturón plegado del Lacandón, Montañas mayas y Plataforma sedimentaria de Yucatán, como se presenta en la figura 2.

Figura 2 Mapa fisiográfico-geomórfico de Guatemala



Fuente: (MAGA, 2002) (IGN, 1972)

### 3.2. SOLOLÁ

El departamento de Sololá está localizado en la región occidental de Guatemala. La mayor parte del territorio departamental se encuentra ubicado en la Sierra Madre, posee varios paisajes característicos: en el paisaje de “montaña” destacan los volcanes de Atitlán (3,537 msnm), Tolimán (3,158 msnm) y San Pedro (3,020 msnm), que forman parte del denominado Cinturón de Fuego del Pacífico. Los otros paisajes representativos, son el paisaje de altiplano en los sectores norte-centro y noroeste del departamento y el paisaje de piedemonte con mayor representatividad en el sector suroeste, en la zona limítrofe con el departamento de Suchitepéquez (MAGA, 2013).

Tiene una extensión territorial de 1,166.80 km<sup>2</sup> (incluyendo el lago de Atitlán), cuenta con 19 municipios repartidos en 1,061 km<sup>2</sup> de territorio y su cabecera departamental está en el municipio de Sololá. El departamento limita al norte con Totonicapán y Quiché, al sur con Suchitepéquez, al este con Chimaltenango y al oeste con Suchitepéquez y Quetzaltenango (CDDS, 2006).

El área total de la cuenca del lago de Atitlán es de 580 km<sup>2</sup> y del lago es de 130 km<sup>2</sup>. La superficie del lago se encuentra a 1,562 m sobre el nivel del mar, presentando su parte más profunda, aproximadamente a 325 m, mientras que la profundidad media es de 220 m. Se ha estimado que el volumen del lago de Atitlán es de 25 km<sup>3</sup> (Skinner, 2002). Las desembocaduras al lago son todas fisuras subterráneas y rezumaderos, de tal forma que el agua escapa por las faldas porosas del lado sur de los volcanes. En su ribera sur, el lago presenta volcanes que alcanzan hasta una altura de 3,550 m sobre el nivel del mar, siendo estos, los volcanes de Atitlán, Tolimán y San Pedro. La ribera del lago presenta una forma ovalada de 21 x 18 km, con dos bahías que corren en dirección al sur, a los lados de los volcanes Atitlán y Tolimán (La Bastille, 1988). Los cuatro afluentes principales del lago de Atitlán son los ríos Panajachel, Quiskab, San Buenaventura y Cascada, todos ubicados en la parte norte del lago.

Los pueblos que se encuentran en las orillas del lago de Atitlán son: Panajachel, Santa Catarina Palopó, San Antonio, San Lucas Tolimán, Santa Cruz la Laguna, San Pablo la Laguna, San Marcos la Laguna, San Juan la Laguna, San Pedro la Laguna y Santiago Atitlán.

*Figura 3 Localización del departamento de Sololá*



Fuente: (MAGA, 2013)

### **3.2.1. GEOLOGÍA DE SOLOLÁ**

Las fallas de Motagua-Polochic, marcan la frontera entre placas de Norteamérica y del Caribe, sobre la cual se ubica el departamento de Sololá. Está formado por materiales de origen volcánico, metamórfico y sedimentario, provenientes de la evolución del istmo centroamericano que es una región joven en términos geológicos (Dengo, 1973). El lago de Atitlán y su entorno volcánico se ha formado en tiempos geológicamente recientes, dentro del período del último ciclo volcánico durante los últimos ciento cincuenta mil años. Sus características fisiográficas y geológicas son las que definen y determinan el entorno actual del área (Rose, 1987); (Newhal, 1987).

Teóricamente, el evento culminante, es la llamada erupción de Los Chocoyos, la cual fue una secuencia de erupciones, que alcanzaron un volumen de 150 km<sup>3</sup> de magma expulsada. En este evento, la columna eruptiva pudo haber alcanzado entre 30 y 50 km de altura, los depósitos alrededor pudieron haber alcanzado 100 km de radio. Las cenizas más finas llegaron hasta Costa Rica, Golfo de Panamá y parte del Estrecho de Florida, esparciéndose sobre áreas que exceden el millón de kilómetros cuadrados. La segunda mitad de la erupción de Los Chocoyos expulsó 120 km<sup>3</sup> de magma y flujos de ceniza que cubrieron por completo el territorio actual de Guatemala (PNUD & SEGEPLAN, 2007). Como parte de este proceso han surgido los volcanes de San Pedro, Tolimán y Atitlán, los cuales se muestran en la figura 4.

*Figura 4 Volcanes surgidos al sur del Lago de Atitlán*



Fuente: (UPGGR-MAGA, 2006)

### **3.2.2. SUELO DE SOLOLÁ**

En el departamento de Sololá existe una influencia marcada de la actividad volcánica, por el aporte de materiales que ha recibido, especialmente de piroclásticos no consolidados, que han permitido dejar los suficientes rasgos o huellas en el perfil del suelo, utilizadas para entender y explicar el proceso evolutivo de los mismos (IGAC, 2007).

### 3.2.2.1. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DE SUELO

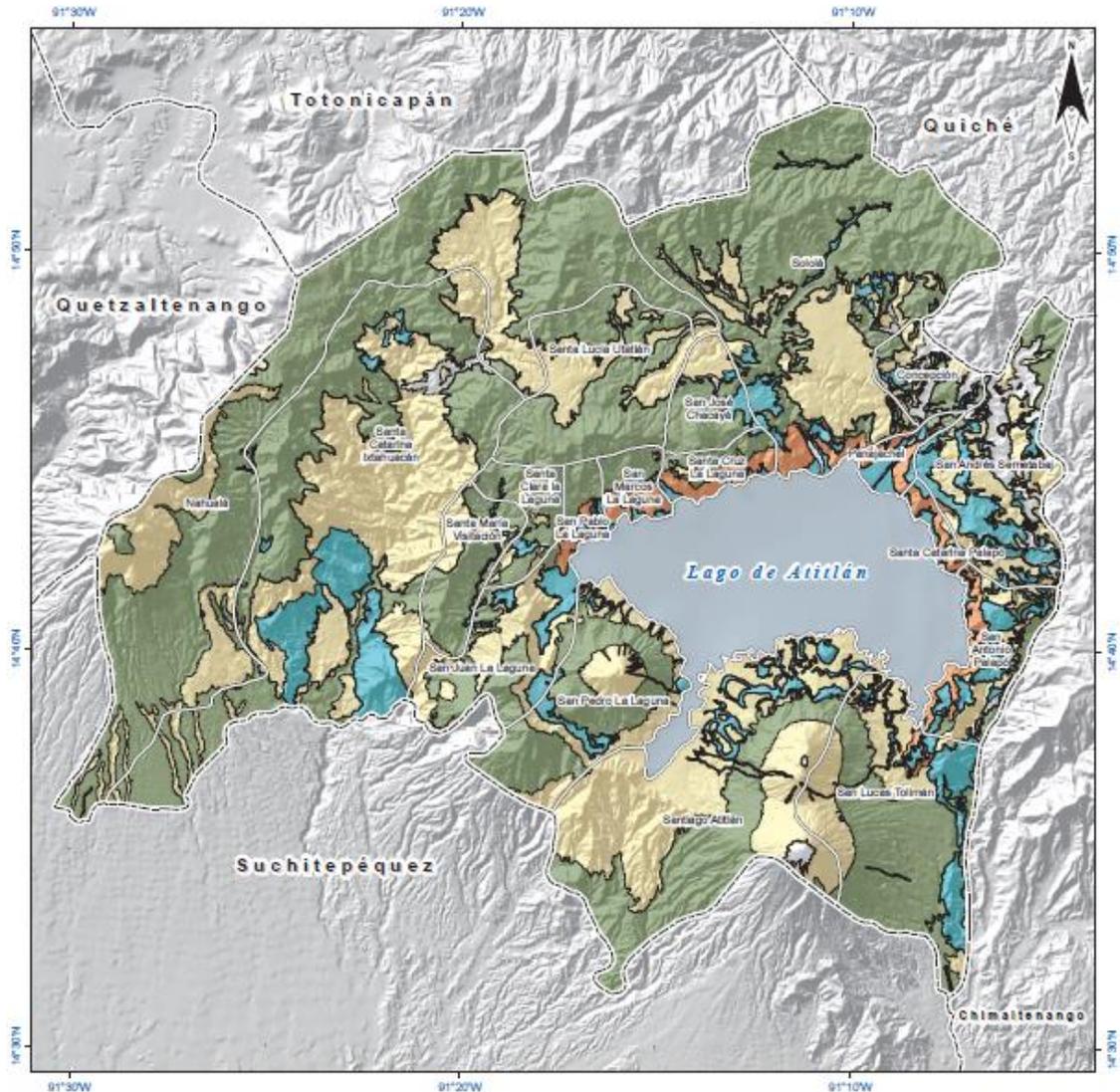
Las clasificaciones taxonómicas se fundamentan en la relación: horizontes morfogenéticos (cualitativos) y horizontes diagnósticos (cuantitativos). Se categorizan por Sistema y Clases que lo conforman (Figura 5), las categorías mayores (del Orden al Subgrupo) reflejan las marcas cuantitativas de la evolución de los suelos. Las categorías menores (familia y serie) buscan generar criterios que apoyen la aplicación de la información y la transferencia agrotecnológica e ingenieril (IGAC, 2007).

Figura 5 Pirámide categórica del sistema norteamericano de clasificación de suelos



En el departamento de Sololá se identificaron 4 de las 12 clases de la categoría Orden que integra el Sistema Norteamericano de Clasificación (Staff, 2010). Las clases están ordenadas de acuerdo con su extensión y son: Andisol (46.7 %), Inceptisol (30.0 %), Milisol (8.5 %) y Entisol (2.3 %), estas se subdividen en Subórdenes, Grandes Grupos, Subgrupos y Familias.

Figura 6 Mapa de clasificación de suelos a nivel de orden del departamento de Sololá



Ordene de suelos	Superficie	
	ha	%
Entisol	2,732	2.34
Inceptisol	34,976	29.98
Andisol	54,382	46.60
Molisol	9,868	8.46
No suelo	2,382	2.04
Cuerpo de agua -Lago de Atitlán-	12,340	10.58
<b>Total del departamento</b>	<b>116,680</b>	<b>100.00</b>

Fuente: Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgos -DIGEGR-. El presente mapa ha sido realizado sobre base cartográfica del Instituto Geográfico Nacional -IGN-.

Proyección Cartográfica: Cuadrícula Geográfica, Datum horizontal WGS84  
Escala de Generación 1:50,000  
Escala de Impresión 1:250,000

Elaborado por: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación -MAGA-, Guatemala  
Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgos -DIGEGR-  
Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC-, Colombia.  
Convenio 43-2006  
"Proyecto Mapa de Taxonomía de Suelos y Capacidad de Uso de la Tierra de la Republica de Guatemala"  
Fecha: Noviembre 2012

Fuente: (MAGA, 2013)

Tabla 1 Clasificación taxonómica de Subgrupo de los suelos de Sololá

Orden	Suborden	Gran Grupo	Subgrupo	Perfiles	
Andisol	Cryands	Vitricryands	Humic Vitricryands	70514	
	Vitrandas	Ustivitrands	Humic Ustivitrands	70201	
		Udivitrands	Humic Udivitrands	71302	
			Typic Udivitrands	71905	
	Ustands	Haplustands	Durustands	Typic Durustands	71312
			Vitric Haplustands	40623, 41115, 70112, 71805	
			Pachic Haplustands	70522	
			Thaptic Haplustands	70509	
			Dystric Haplustands	70104, 70107, 70113, 70301, 70401, 70402, 70502, 70510, 70511, 70516, 70517, 70521, 70602, 71205, 71801, 71806,	
			Humic Haplustands	30608, 70105, 71303, 71314	
	Udands	Hapludands	Vitric Hapludands	71304, 71307	
			Typic Hapludands	40809, 40814, 70610, 70524, 70611, 71305, 71317, 71909,	
	Entisol	Fluvents	Ustifluvents	Typic Ustifluvents	71705
Orthents		Ustorthents	Lithic humusteps	71707	
			Vitrantic Ustorthents	41107	
			Typic Ustorthents	70501, 70114, 70608, 71201	
Inceptisol	Aquepts	Endoaquepts	Typic Endoaquepts	71901	
	Ustepsts	Durustepts	Typic Durustepts	71001	
			Lithic Humustepts	70904, 71002, 71708	
		Humustepts	Andic Humustepts	70101, 70102, 70103, 70111, 70403, 70503, 70513, 70601, 70901, 70909, 71206, 71208, 71309, 71320, 71321, 71322, 71803, 71902, 71903, 70518, 70519,	
			Typic Humustepts	70504, 70603, 70607, 71908, 70506	
			Dystrustepts	Andic Dystrustepts	70905, 71204
		Haplustepts	Haplustepts	Humic Dystrustepts	40403
				Typic Dystrustepts	40206, 40615, 40710
				Andic Haplustepts	31006, 31410, 40212
				Fluentic Haplustepts	70505
				Dystric Haplustepts	41402
	Udepts	Haplustepts	Typic Haplustepts	70906	
			Humudepts	Andic Humudepts	70515, 70609, 71907, 70525, 70523, 70613
			Eutrudepts	Andic Eutrudepts	40812
	Molisol	Ustolls	Haplustolls	Dystrudepts	Typic Dystrudepts
Durustolls				Entic Durustolls	70912, 70801
Lithic Haplustolls				71202, 71401	
Andic Haplustolls				40612, 70902, 71313, 71706, 71802, 71904, 40706, 71003, 71209, 71906	
Vitrantic Haplustolls				30311	
Cumulic Haplustolls				30105	
Pachic Haplustolls				70903	
Fluentic Haplustolls				30404, 70106, 70110	
Entic Haplustolls				70108, 71101, 71102	
Typic Haplustolls		40903, 41403, 70512, 70910, 71207, 71308, 71807, 71203, 71306, 71324			
Udolls	Hapludolls	Vitrantic Hapludolls	71316		
		Typic Hapludolls	71301, 71323		

Fuente: (MAGA, 2013)



Tabla 2 Leyenda integrada del mapa geológico escala 1:50,000 y 1:250,000

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SUPERFICIE	
		ha	%
Qpa	Pómez	37.036	31.74
Qpa2			
Qpa2-Qpa4			
Qpa2-Qpf3			
Qpa3			
Qpa4			
Qpa4-(Qal)			
Qpa4-Qpa3			
Qpf1			
Qpf2			
Qpf3			
Qpf-Qpf3			
Qpf3			
Qps3			
Tpf3			
Qa			
Qad			
Qa-Qpa4			
Qb			
QTa			
QTa-Ta			
Qtb			
Qtd			
QTv			
Qvd			
Qvdf			
Ta			
Td			
Tv			
Tbg	Rocas graníticas	11.077	9.49
Tbg-Thbd			
Tf			
Tg			
Thbd			
Tsp			
Tc1	Tobas	6.166	5.28
Tc2			
Tmt			
Tmt1			
Tmt2			
Tmt3			
Tmt4			
Tmt4-i			
Tmt5			
Tpt			
Tsjt			
Txt1			
Txt2			
Txt2d			
Qls	Sedimentos de rellenos de calderas (Fase 1 y 2). Sedimentos lacustres	1.215	2.5
Tcf			
Tcf1			
Tcf2			
Tpm	Aluvión Pómez	373	1.04
Qal			
Qr	Domos volcánicos en dacita y riolita	373	0.32
Qrd			
Qrdf			
Kms	Metasedimentos	108	0.09
Qscl	Brechas intrusivas	17	0.01
Ttl	Diques anuales félsicos	13	0.01
Trd			
Trd2			
Trd3			
Ksd	Carbonatos	7	0.01
Total a escala 1:50,000		93,586	80.2
Tv	Rocas volcánicas sin dividir	9,447	8.1
Qp	Pomez	1,251	1.1
Tvs	Sedimentos volcano-clásticos	9	0.01
Total a escala 1:250,000		10,707	9.2
	Cuerpo de Agua	12,340	10.6
	Sin Mapear	47	0.04
Total departamento		116,690	100

Fuente: (MAGA, 2013)

### **A. Pómez**

Es una roca ígnea de origen piroclástico, se crea en forma de espuma, cuando el magma es expulsado y el enfriamiento es rápido, fragmentándose y repartiéndose como material suelto. En Sololá cubre una superficie de 37,036.2 ha, equivalentes al 31.74 % del área total del departamento (MAGA, 2013).

### **B. Granito (Rocas graníticas)**

Es una roca metamórfica de grano duro, mediano y grande; su color varía entre gris claro, rosado y amarillento. Se compone esencialmente de cuarzo, feldespatos y mica (Holmes, 1980). Estas rocas ocupan una superficie de Sololá, 11,076.5 ha, equivalentes al 9.49 % del total departamental (MAGA, 2013).

### **C. Tobas**

Son rocas calizas porosas y ligeras constituidas por el mineral calcita. La toba calcárea se forma por precipitación de calcita cuerpos de agua. Mientras que la toba volcánica, se forma por acumulación de cenizas expelidas por los respiraderos durante una erupción volcánica (Arenas, y otros, 2010; Nuñez y Martínez, 2011).

### **D. Sedimentos de relleno de calderas, sedimentos lacustres**

- i. **Sedimentos de relleno de calderas:** Existen dos variaciones, la primera, son conglomerados y areniscas, ricos en: gravas, lutitas y pizarras. La segunda son compuestos por pómez, sílex, arenas, lutitas y pizarras.
- ii. **Sedimentos lacustres:** Material compuesto de lutitas arcillosas y tobas diatomáceas estratificadas. (MAGA, 2013).

Ambas corresponden al 2.55 % de área total en Sololá, con una superficie de 2,972.3 ha, (MAGA, 2013).

### **E. Aluvión pómez**

Se nombra así a las rocas que se han meteorizados, depositados y acumulado por corrientes de agua en las partes bajas de las montañas. Ocupa un área de 1,211.9 ha en Sololá, equivalente a 1.04 % de superficie del departamento (MAGA, 2013).

### **F. Domos volcánicos en dacita y riolita**

Los principales materiales en la unidad geológica son rocas ígneas (dacitas y riolitas), ocupando un área total de 372.7 ha en Sololá, equivalentes al 0.32 % del total departamental (MAGA, 2013).

### **G. Metasedimentos**

Un material compuesto de lutitas y tobas diatomáceas. Con un área de 107.6 ha en Sololá, equivalente al 0.09 % de la superficie departamental (MAGA, 2013).

### **H. Brechas intrusivas**

Es una roca compactada, poco impermeable, disgregada en bloques de tamaños decimétricos y afectadas por movimientos de ladera. Ocupan un área de 16.8 ha, equivalentes a 0.01% del área de Sololá (MAGA, 2013).

### **I. Diques anulares félsicos**

Son intrusiones ígneas formadas por magma en fisuras verticales, que al enfriarse crean una placa rocosa, que corta transversalmente los planos de estratificación (Holmes & Colmes, 1980). El área que ocupan es de 12.5 hectáreas, equivalentes a 0.01 % del área de Sololá (MAGA, 2013).

## J. Carbonatos

Están compuestas por esquistos, gneis, migmatitas y mármol. El principal material son calizas recristalizadas con capas delgadas de limos. Ocupan un área de 6.9 ha, correspondiente al 0.01 % del total de Sololá (MAGA, 2013).

## K. Mineralogía de los materiales parentales

Para el análisis de la composición mineralógica de Sololá se seleccionó el 14 % de los perfiles conocidos, en la fracción arcilla y arena. En la tabla 3 se presenta la composición mineralógica de la fracción arcilla de los suelos del departamento.

*Tabla 3 Promedio de la composición mineralógica de arcilla de los suelos*

Constitución mineralógica	Número de muestras presentes y rangos de interpretación de la composición mineralógica de la fracción arcilla						Total muestras analizadas
	>50%	30-50%	15-30%	5-15%	<5%	0%	
Material no cristalino	25	3	5				33
Feldespatos			15	4	7	7	33
Haloisita			3	1	11	18	33
Esmectitas		2				31	33
Cristobalita				1	20	12	33
Matahaloisita				3	11	19	33
Integrados 2:1-2:2				1	6	26	33
Caolinita		1	1	2	4	25	33
Cuarzo		1				32	33

Fuente: (MAGA, 2013)

*Tabla 4 Composición promedio de los minerales que componen los piroclastos*

Minerales	Porcentaje
Feldespatos (Plagioclasas)	24
Opacos	17
Cuarzo	12
Piroxenos	8
Anfíboles	3
Circón	3
Vidrio volcánico	2
Feldespato potásico	1
Productos alterados	28

Fuente: (MAGA, 2013)

## L. Mineralogía de suelos de moderada a baja evolución

Los suelos analizados de Sololá muestran el predominio de minerales primarios como feldespatos de la serie plagioclasas y anfíboles (hornblenda, y tobas vítreas). La presencia de estos minerales asegura alta fertilidad de los suelos, pues estos son característicos de suelos de bajo desarrollo (MAGA, 2013).

## **M. Material Volcánico**

Atitlán, al ser zona volcánica, es propensa a alteraciones temporales en la atmósfera y prolongados en la geosfera local generadas por los gases, cenizas y calor emitidos por el volcán. Estos cambios dependen de los estados climáticos y ambientales del lugar (OPS, 2005). Una erupción volcánica emite a la atmósfera cantidades indeterminadas de gases y cenizas, impulsadas a grandes distancias por la onda de energía térmica y la presión confinada en el magma. Los productos son depositados en la estratósfera y tropósfera, mientras son dispersados por la acción del viento y la lluvia (OPS, 2005).

- i. Gases Emitidos** Los principales gases emitidos por la actividad volcánica se compone en su mayoría por agua (H<sub>2</sub>O) (75 %), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), ácido clorhídrico (HCl), ácido fluorhídrico (HF). En menor proporción, se pueden encontrar metano (CH<sub>4</sub>), monóxido de carbono (CO), nitrógeno (N<sub>2</sub>), argón (Ar), helio (He), hidrógeno (H<sub>2</sub>), mercurio (Hg) y radón (Rn), productos secundarios y su concentración se dispersa fácilmente en la naturaleza (OPS, 2005).
- ii. Ceniza volcánica** Se presenta como polvo fino, con alturas de 1 a 3 cm (zona de mediano riesgo) y de 5 a 10 cm (zona de alto riesgo). Proviene del desmoronamiento de rocas líticas por la descarga de presión sobre el magma. Su estructura porosa y húmeda permite absorber gases volátiles solubles en el agua, presentando mayor riesgo tóxico. Está compuesta por óxidos, principalmente de sílice, aluminio y hierro (80 %), magnesio, calcio, sodio, potasio, plomo, vanadio, cromo, cobalto, níquel y zinc (OPS, 2005).
- iii. Flujos de lava, piroclastos y lodo** Las unidades geológicas corresponden a los estrato-volcán de San Pedro, Atitlán y Tolimán e incluyen el Cerro de Oro, originados por las erupciones de flujos de lava, lodos y piroclastos (Nuñez & Martínez, 2011). Contiene bloques de andesitas expuestos por el deslizamiento desde los cañones o barrancos volcánicos hacia las laderas bajas o planas. Este material se encuentra en los municipios de Concepción,

Nahualá, Panajachel, San Andrés Semetabaj, San Antonio Palopó, San José Chacayá, San Juan la Laguna, San Lucas Tolimán, San Marcos la Laguna, San Pablo la Laguna, San Pedro la Laguna, Santa Catarina Ixtahuacán, Santa Clara la Laguna, Santa Cruz la Laguna, Santa Lucía Utatlán, Santa María Visitación, Santiago y Sololá, ocupando una superficie de 34 606 ha, el 29.66 % del área total del departamento (MAGA, 2013).

**iv. Sedimentos volcano-clásticos** Materiales compuestos de lutitas arcillosas y tobas diatomáceas; la presencia de diatomeas, indican su desarrollo en aguas tranquilas del tipo lacustre. Se distribuyen en el municipio de Sololá, abarcan 8.7 ha, 0.01 % de la superficie departamental (MAGA, 2013).

### **3.3. METALES EN EL LAGO DE ATITLÁN**

Los metales se encuentran en aguas superficiales en forma coloidal, de partículas y disueltos; principalmente como hidróxidos, óxidos, silicatos o sulfuros, o bien adsorbidos en la arcilla, en el silicio y en la materia orgánica. Las formas solubles generalmente son iones, quelatos o complejos organometálicos no ionizables generalmente controlados por el pH del medio y tipo de ligandos (nivel de absorción y estado de oxidación del metal) (Padín & Iriart, 2003).

La presencia de metales pesados en el Lago de Atitlán se atribuye a la naturaleza geoquímica del terreno, las condiciones ambientales y a la actividad antropogénica de los alrededores (Padín & Iriart, 2003). La contaminación por causas naturales se debe generalmente a erupciones volcánicas, deposición de cenizas aéreas y erosión natural (Roldan, 1992) de los alrededores. Mientras que en la contaminación antropogénica se destaca la industria, asentamientos humanos, actividad doméstica y el arrastre de contaminantes por alcantarillados (Padín & Iriart, 2003).

A diferencia de los compuestos orgánicos, los metales pesados no pueden degradarse ni destruirse en condiciones bióticas, consecuencia de esto, tienden a mantener un alto potencial de bioacumulación en los organismos vivos que habitan el medio ambiente acuático y a los humanos como resultado de la ingestión de alimentos contaminados y agua potable. La toxicidad de los metales depende de la concentración, el tiempo de exposición a estos y la oxidación del metal. Metales como arsénico, cadmio, cobre, hierro, níquel, plomo, mercurio, cromo, cinc, entre otros, son potencialmente peligrosos para la salud (Prasad, Subramanian, & Paul, 2009).

El Lago de Atitlán, ubicado en el altiplano, caracterizado por rodearse de volcanes (siendo tres los más cercanos, el volcán San Pedro, Santiaguito y Atitlán), se caracteriza por sus suelos ricos en material volcánico, que naturalmente contiene metales característicos de los flujos de lava expulsado en cada erupción a lo largo del tiempo. Esto aumenta la probabilidad de una contaminación natural del cuerpo de agua, por lo que se han realizado diferentes estudios para identificar y determinar las concentraciones de distintos metales en el Lago de Atitlán (Prasad, Subramanian, & Paul, 2009).

En el análisis de metales en plantas acuáticas características del lago de Atitlán, realizado en 2009, se reportó arsénico (As), plomo (Pb), cadmio (Cd), y zinc (Zn), a diferentes concentraciones cuantificables, como se muestra a continuación:

*Tabla 5 Concentración de metales en plantas acuáticas  
y peces del lago de Atitlán*

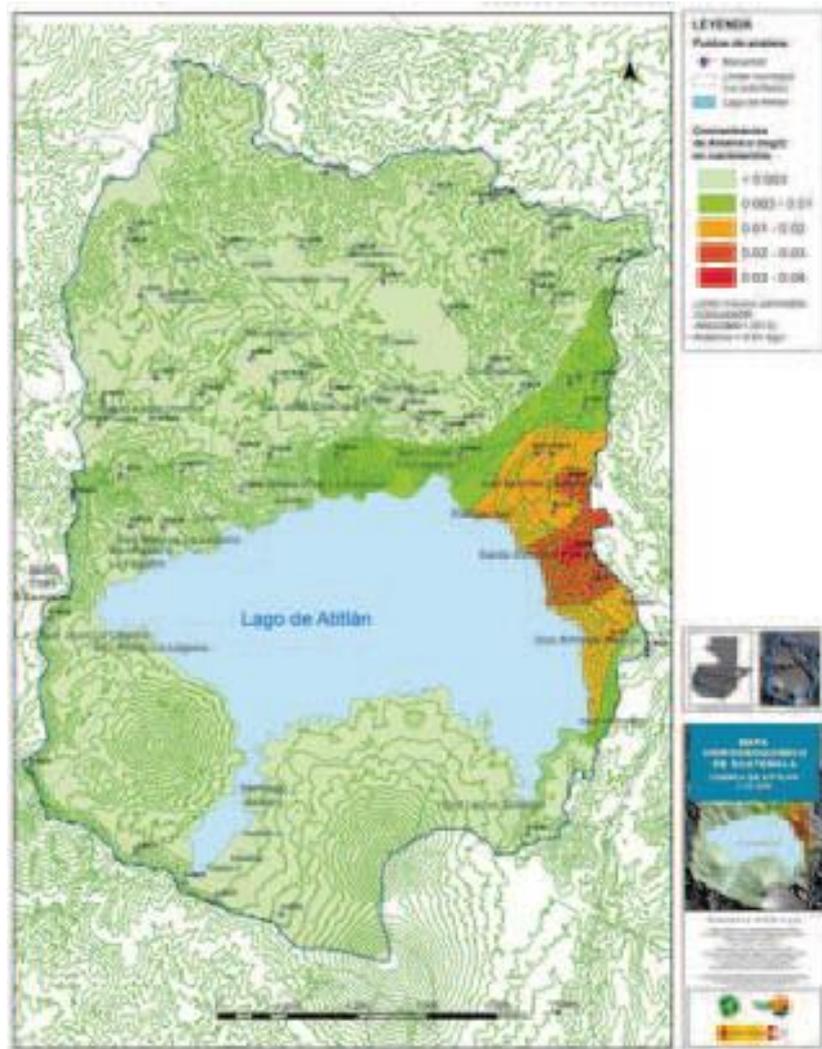
Especie	Zn (mg/Kg)	Pb (mg/Kg)	Cd (mg/Kg)	As (mg/Kg)
<i>Potamogeton pectinatus</i>	11,000	156	120	64
<i>Erigeria densa</i>	2513	91.5	42	115
<i>Eichornia crassipes</i>	3,210	151	16	177
<i>Typha domminguensis</i>	995	65.2	5	39.9
<i>Utricularia gilbba</i>	635	180	186	136
<i>Hydrilla sp</i>	4,330	224	80.5	72.5

Fuente: (Oliva, Perez, Del Cid, Martinez, & Valladares, 2010)

Algunos de los metales presentan altas concentraciones, sobrepasando los límites máximos permitidos en agua por COGUANOR NTG29001. El grupo de investigación considera que el paso de la Tormenta Tropical Stan alteró las condiciones ambientales debido al arrastre de gran cantidad de suelo al lago, lo cual, en conjunto con la elevación de los niveles de contaminación antropológica, ha facilitado el aumento tanto de nutrientes, como de metales (Oliva, Perez, Del Cid, Martinez, & Valladares, 2010).

Por otro lado, en 2013, en el Estudio y cartografía hidrogeológica y de recarga en la carga de lago de Atitlán, aproximadamente el 25 % de las muestras presentaron concentración de arsénico (As) por encima de 0.01 mg/l (límite máximo permisible por la norma COGUANOR NTG29001). La mayor concentración de As aparece en el centro-oriente de la cuenca, en los municipios de Panajachel, San Andrés Semetabaj, Santa Catarina Palopó y San Antonio Palopó. Las muestras con mayor concentración (0.05 - 0.13 mg/L) fueron asociadas en parte a la actividad hidrotermal (pozos y nacimientos), pues en estas zonas, se han encontrado altas concentraciones de As (0.01 - 0.04 mg/l). Por otro lado, la zona centro-oriental se caracteriza por ser un área donde aparecen depósitos piroclásticos con lapilli acrecional (peloides formados por la acreción de ceniza fina alrededor de gotas de agua de condensación o partículas sólidas, a menudo en el interior de columnas eruptivas ricas en vapor.). Por lo que la presencia de arsénico en disolución acuosa en la cuenca del lago de Atitlán se atribuye al lavado de depósitos piroclásticos (asociado a antiguas erupciones freatomáticas) o rocas afectadas por la alteración hidrotermal actual (GM, 2013).

Figura 8 Mapa isoquímico del ion arsénico en los nacimientos de la cuenca



Fuente: (GM, 2013)

En 2015, se encontró arsénico (As) y mercurio (Hg) en sedimentos de aguas superficiales del lago de Atitlán a concentraciones cuantificables. En la mayoría de los sitios de muestreo, el As se identificó en concentraciones superiores a límites recomendados para agua potable. Lo cual identificó al agua del lago como no apta para el consumo humano (Pérez-Sabino, y otros, 2015).

### **3.4. METALES: EFECTOS EN LA SALUD Y AMBIENTE**

#### **3.4.1. ARSÉNICO (As)**

El arsénico es un elemento químico de la tabla periódica cuyo símbolo es As y su número atómico es 33. En la tabla periódica se encuentra en el grupo de los metaloides. El arsénico es común en la atmósfera terrestre, en rocas y suelos en la hidrósfera y la biósfera. Es llevado al ambiente a través de una combinación de procesos naturales como la meteorización, actividad biológica y emisiones volcánicas; mientras que de forma antropogénicas se presentan en actividades mineras, uso de combustibles fósiles, uso de pesticidas, herbicidas, entre otros (Uthus, 1994). Se puede encontrar en diferentes estados de oxidación: arseniato As (V), arsenito As (III), en su forma elemental As (0) y arseniuro As (-III) (Tsai et al., 2009); encontrándose más frecuentemente como arsenito o arseniato. El arsenito es 70 veces más tóxico que las especies metiladas y 10 veces más tóxico que el arseniato, el cual es poco soluble en agua y, por tanto, menos biodisponible (Kumaresan & Riyazuddin, 2001; ValenzuelaCampos, J., Yañez, C. Zarror, A. & Mondaca, M., 2009; Foa, Colombi, & Maroni, 1984).

Los efectos tóxicos del As en el ser humano dependerán del modo y la duración de exposición, la fuente y el tipo de arsénico. La dosis letal en As en un adulto será 1-4 mg As/Kg y sus compuestos  $AsH_3$ ,  $As_2O_3$  y  $As_2O_5$  la dosis varía entre 1.5 mg/Kg y 500 mg/Kg según la masa del cuerpo. El arsénico afecta la vía digestiva, presentando dolores abdominales, vómitos, diarrea y deshidratación. La pérdida de sensibilidad en el sistema nervioso periférico es el efecto neurológico más frecuente; aparece de una a dos semanas después de grandes exposiciones. Exposiciones prolongadas y a altas concentraciones de este elemento son nocivas para la salud humana. Promueve diversos tipos de cáncer, patologías cardiovasculares, diabetes, anemia y alteraciones reproductivas, inmunológicas, neurológicas y del desarrollo (Lillo, 2008).

Ambientalmente el arsénico es considerado tóxico por sus características bioacumulativas, por su persistencia y los efectos desfavorables para la flora, fauna y salud humana. Los peces pueden ver afectado su material genético, principalmente por el consumo de plantas acumuladoras de arsénico. Existen plantas que absorben fácilmente este metal, tolerando altos rangos de concentraciones, los cuales pueden estar presentes en los alimentos humanos y especies acuáticas (Uthus, 1994).

### 3.4.2. CADMIO (Cd)

El cadmio es un elemento químico de número atómico 48 situado en grupo 12 de la tabla periódica de los elementos. Su símbolo es Cd. Es un metal pesado, blando, blanco azulado, relativamente poco abundante, sobre todo en la corteza terrestre. Es un metal dúctil, blando y maleable. Su masa atómica es de 112.40 y densidad relativa de 8.65 a 20 °C. Su punto de fusión de 320 °C y de ebullición de 765 °C. Tiene ocho isótopos estables en la naturaleza y se han descrito once radioisótopos inestables en la naturaleza y se han descrito once radioisótopos inestables de tipo artificial. Su estado de oxidación más común es el  $\text{Cd}^{2+}$ , y se encuentra en su estado de oxidación  $\text{Cd}^{1+}$  con menor regularidad, debido a la inestabilidad de este. En la naturaleza se encuentra asociado a otros metales como el zinc, plomo y cobre (Emsley, 2003).

Es considerado uno de los metales más tóxicos en los organismos vivos, aún en concentraciones pequeñas. Se puede absorber por tres vías diferentes: oral, respiratoria o dérmica, mayormente a través de la comida. Al exponerse a altas concentraciones de cadmio, este se transporta al hígado por vía sanguínea y se une a distintas proteínas formando complejos que son dirigidos a los riñones, en donde se acumulan y dañan el músculo, además, puede ocasionar presión sanguínea alta, debilitamiento óseo, fallas en la reproducción, daños en los nervios y cerebro, entre otros efectos, (ATSDR, 1999).

Este no se encuentra naturalmente en la corteza terrestre, sin embargo, se transporta grandes distancias al ser absorbido en lodos, en la descomposición de rocas, actividad volcánica, quema de combustibles fósiles y residuos antropológicos, contaminando así, aguas superficiales y suelos. El cual es absorbido por la materia orgánica, por su alto potencial de bioacumulación en microorganismos, tejidos vegetales y animales, por su persistencia en el ambiente y el fácil transporte mediante los recursos de agua y viento. El comportamiento del cadmio en agua depende de su especiación, pH y temperatura. Las aguas superficiales suelen tener menos de 1 µg/L de Cd (Marín, 2003).

### 3.4.3. **MERCURIO (Hg)**

El mercurio es un elemento químico con símbolo Hg, número atómico 80 y masa atómica 200.59. A temperatura ambiente es líquido blanco-plateado, con punto de fusión de -38.4 °C y ebullición a 357 °C. En sus compuestos, se encuentra en estados  $Hg^{1+}$ , que es un estado de oxidación aparente. En realidad, es un dímero formado por dos cationes mercurio (I) unidos mediante enlace covalente, que en soluciones ácidas existe como catión mercurioso,  $Hg_2^{2+}$  (Burriel F., Conde, F., Jimeno, S. & Hernández, J., 2006). El mercurio Hg (I) es diatómico y se caracteriza por ser soluble en soluciones oxidantes y formar amalgamas con algunos metales (oro, plata, platino, uranio, cobre, plomo, sodio y potasio). Los átomos de mercurio pueden presentar enlaces covalentes; algunas de sus sales son solubles en agua y por lo general están disociadas. Las soluciones acuosas de estas sales reaccionan como ácidos fuertes generada por la hidrólisis en el medio (Jensen, 2008).

El mercurio puede tener efectos tóxicos. En su forma iónica no establece enlaces químicos y tiene la capacidad de precipitar proteínas de varias enzimas esenciales. Se fija a los grupos ricos en radicales -SH, altera el sistema metabólico y enzimático de la célula y su pared e inhibe la síntesis de proteínas en la mitocondria, afectando su función energética y causando lesión celular en el tejido (Ramirez, 2008). El mercurio induce la formación de metalotioneína, un receptor proteico de bajo peso molecular y se une a él, saturando sus receptores.

Cuando la metalotioneína se forma en exceso, se alteran los sitios de producción (UNEP, 2013). Otros efectos son alérgias, irritación de piel, cansancio, dolor de cabeza, daños al sistema nervioso, daños de esperma, defectos de nacimiento y abortos, funciones cerebrales, ADN y cromosomas (Ramirez, 2008).

El mercurio entra en el ambiente por la ruptura de minerales y suelos a través de su exposición al viento y agua. Es un contaminante con alto potencial tóxico persistente, bioacumulativo y biomagnificado en la red trófica. De forma natural se encuentra a bajas concentraciones, sin embargo, en las últimas décadas se ha incrementado debido a emisiones antropogénicas. El Hg inorgánico descargado en los ecosistemas acuáticos se incorpora a los sedimentos por su alta afinidad al material particulado (Le Roux, Turner, Millward, Ebdon, & Appriou, 2001). Se encuentra en forma metálica, de forma iónica y formando compuestos organometálicos, principalmente metilmercurio (Gilmour, y otros, 1998).

#### 3.4.4. **PLOMO (Pb)**

El plomo es un elemento químico cuyo símbolo es Pb, su número atómico es 82 y su masa atómica 207.19; es un metal pesado (densidad relativa, o gravedad específica de 11.4 a 16 °C), de color azul/grisáceo mate. Es flexible, inelástico, su punto de fusión es de 327.4 °C y su punto de ebullición de 1725 °C. Formando compuestos se encuentra con valencias de  $Pb^{2+}$  y  $Pb^{4+}$  (Emsley, Nature's building blocks, 2001). El plomo (IV) es un estado de oxidación en el que se encuentra el plomo en numerosos compuestos. A diferencia del plomo (II), no se encuentra libre como catión ni en medios muy ácidos por su alta inestabilidad debida al alto valor de su relación carga/masa El plomo (II) se encuentra en numerosos compuestos. En medio acuoso, a pH menores a 7.8, puede encontrarse como  $Pb^{2+}$ ; un catión incoloro debido a la estabilidad de su configuración electrónica  $[Xe]6s^2$  que impide transiciones electrónicas en longitudes de onda del espectro visible. Por otro lado, es estable en soluciones ácidas o neutras, a medida que aumenta el pH se hidroliza parcialmente formando la especie de monohidroxoplomo (II),  $PbOH^+$  (F. Burriel Martí, F. Lucena Conde, S. Arribas Jimeno & J. Hernández Méndez 2006).

Los efectos del envenenamiento por plomo afectan según la forma fisicoquímica en que se encuentre, influye en su distribución y comportamiento, así como en su potencial de absorción y toxicidad. Generalmente, los daños pueden ser neurológicos o teratógenos, presenta carácter carcinógeno y puede provocar la enfermedad conocida como saturnismo, la cual se caracteriza por la acumulación de este metal en los huesos, nervios y en el sistema renal e hígado, alojándose principalmente en los tejidos grasos o adiposos (Marín, 2003). Los síntomas incluyen coeficientes intelectuales menores, cambios en el comportamiento y desorden en la concentración (Lenntech, 1988).

Su asimilación en ecosistemas acuáticos y sedimentos parece estar determinada por su biodisponibilidad, generalmente más baja cuando hay presencia de materia orgánica o mineral; además, de la temperatura, la salinidad, el pH y el contenido de ácidos húmicos y fúlvicos (OMS, 1995). Por otro lado, existen organismos acuáticos capaces de asimilar y acumular altas concentraciones de plomo, sobre todo al estar presente en compuestos orgánico, pues aumenta su característica lipofílica y por tanto su toxicidad (Pain, 1995). La acumulación de plomo en los organismos acuáticos y de los suelos, limita la síntesis de clorofila en las plantas y afecta las funciones del fitoplancton que es importante en la producción de oxígeno y nutrientes para otros organismos, repercutiendo en los balances de los ecosistemas (ATSDR, 1999).

### **3.5. FITORREMEDIACIÓN**

La fitorremediación es un conjunto de tecnologías que reducen la concentración de diversos compuestos a partir de procesos bioquímicos realizados por plantas y microorganismos asociados (Kelley, Gaither, Baca-Spry, & Cruickshank, 2000). Aprovechando así, la capacidad de estas plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el ambiente, como: metales pesados, metales radioactivos, compuestos orgánicos y compuestos derivados del petróleo. (Eapen, Singh, & D`Souza, 2007) (Cho, Yavuz-Corapcioglu, Park, & Sung, 2008). Se han identificado una amplia diversidad de especies con esta propiedad, algunas de ellas, tienen capacidad

para acumular metales pesados, estas reciben el nombre de hiperacumuladoras (Yang, y otros, 2004). Estas plantas acumulan al menos 100 µg/g de Cd y As; 1000 µg/g de Co, Cu, Cr, Ni y Pb; y 10 000 µg/g de Mn (todas con 0.01 % peso seco) (Kamal, Mahmoud, & Cote, 2004) (McGrath, Zhao, & Lombi, 2001).

### 3.5.1. HIPERACUMULACIÓN

Las plantas absorben metales del suelo en distintas concentraciones, dependiendo de la especie, sus características y contenido en metales del suelo. Las plantas pueden adoptar distintas estrategias frente a la presencia de metales en su entorno (Baker, McGrath, Reeves, & Smith, 2000). Las especies sensibles y tolerantes a los metales tienen resistencia a los metales excluyéndolos de la planta y restringiendo su transporte. Otras especies acumulan el metal en la parte aérea en forma no tóxica (Barceló, y otros, 2001). De acuerdo con la estrategia de acumulación, existen plantas que superan 100 o más veces los valores de metales acumulados en otras plantas, a estas se les llama hiperacumuladoras. Siendo así, especies tolerantes a uno o más metales pesados en un amplio rango de concentraciones de metales, pues no son competitivas en zonas no contaminadas (Baker, McGrath, Reeves, & Smith, 2000). La capacidad de sobrevivir y crecer en suelos contaminados, acumulando gran cantidad de metales convierte a las hiperacumuladoras en organismos indicados para la fitoextracción.

La hiperacumulación implica mecanismos internos de detoxificación de los iones metálicos libres para evitar que puedan causar daño oxidativo a las células. La planta se protege formando complejos metálicos estables menos tóxicos y/o secuestrando los metales desde zonas con un metabolismo activo (citoplasma) hacia el interior de vacuolas o en la pared celular, donde no puedan ocasionar efectos adversos (Krämer, Cotter-Howells, Charnock, Baker, & Smith, 1996). La tolerancia en estas plantas no viene determinada por la acción de un solo mecanismo interno, sino de varios que actúan conjuntamente. En general, las hiperacumuladoras presentan una tasa de crecimiento baja, poca producción de biomasa y un sistema radicular pobre, debido al costo energético que supone acumular metales (Schat, Llugany, & Bernhard, 2000).

### **3.6. *Hydrilla verticillata***

*Hydrilla verticillata* es una planta exótica acuática sumergida, que pertenece a la familia Hydrocharitaceae, nativa del Sudeste de Asia. Esta planta tiene una variada gama de métodos de reproducción, por semillas, vástagos, tubérculos o rizomas y crece de 2 a 4 pulgadas diarias, alcanzando su longitud máxima de 7 metros aproximadamente, bajo condiciones óptimas (Tzanches, 2004).

Posee características metabólicas que propician su reproducción y crecimiento excesivo, como la facilidad para crecer a bajos niveles de dióxido de carbono, capturando remanentes del mismo y almacenándolos en espacios aéreos; tiene capacidad de realizar fotosíntesis con 10-20 % del nivel de luz requerido por otras plantas, resiste hasta 7 g/L de salinidad y vive en un amplio rango de pH (Robinson, 2002) por lo que crece en aguas más profundas que la mayoría de plantas subacuáticas. Bajo estas condiciones puede crecer 1 plg diaria, hasta conseguir el tamaño promedio (TCA, Tribunal Centroamericano de Agua, 2004). Por las propiedades antes mencionadas, la introducción de esta planta acuática provoca una alta competencia con las especies nativas, desplazándolas o eliminándolas, de tal forma que afecta radicalmente a los ecosistemas de los cuerpos acuáticos en que se deposita (Bonilla & Santamaría, 2013).

#### **3.6.1. PROPIEDAD HIPERACUMULADORA DE *Hydrilla verticillata***

*H. verticillata* al ser una macrófita sumergida, y presentar amplia superficie específica sobre la cual se fija una abundante flora microbiana, cuyo crecimiento se favorece por el oxígeno que bombean las hojas hacia dicha zona. El conjunto formado por las raíces y microorganismos actúa como filtro que separa la materia orgánica disuelta y los compuestos minerales. El rápido crecimiento le da un alto potencial de acumulación de metales pesados, como Pb, Cu, As, Ni, entre otros (Mishra, y otros, 2006). Existen estudios en los que se reporta la habilidad para acumular metales y la resistencia a la toxicidad que estos producen en otras plantas. Para esto, se toma en cuenta que los efectos dañinos principales de los metales en componentes celulares, repercute en la peroxidación lipídica, en los niveles de contenido proteico, de ácidos nucleicos y clorofila (Filippis, 1979).

El deterioro de la membrana en condiciones de estrés metálico, se ve afectada principalmente por la peroxidación lipídica, pues los metales tienden a catalizar las oxidaciones de los tioles por su afinidad con los grupos -SH, provocando la producción de radicales libres (principalmente  $O_2\bullet$ ,  $OH\bullet$ ,  $O\bullet$ ), iniciando la peroxidación de ácidos grasos poliinsaturados (Kappus, 1985). El nivel de los efectos tóxicos en la planta depende de la concentración del metal, el tiempo de exposición a este y factores físicos como pH y temperatura del medio en el que se encuentran. La capacidad de soportar la toxicidad de los metales depende del mecanismo interno de la planta. La cisteína es un aminoácido del glutatión (GSH) y es tomada en cuenta como parámetro determinante del mecanismo de defensa. La disminución de cisteína celular se debe a la incorporación de GSH, el cual es un precursor de síntesis fitoquelatina (PC), que es un fuerte antioxidante. Con base en esta información *H. verticillata* ha mostrado la remoción de metales pesados de interés en este estudio:

#### **3.6.1.1. Arsénico (As)**

La acumulación total de As es mayor con As (III) (315  $\mu\text{g/g}$  a 25  $\mu\text{M}$ ) en comparación con As (V) (205  $\mu\text{g/g}$  a 250  $\mu\text{M}$ ) después de 168 h de tratamiento. Las plantas toleran bajas concentraciones de As (III) y As(V) al desintoxicar el metaloide a través de la síntesis aumentada de tioles como las fitoquelatinas y a través de la mayor actividad de las enzimas antioxidantes. Mientras que As(V) estimuló predominantemente la actividad enzimática antioxidante, As (III) causó principalmente niveles mejorados de tioles (Srivastava, Mishra, Tripathi, Dwivedi, & Tandon, 2007). La capacidad de desintoxicación de las plantas para As (V) esta correlacionada con la actividad de AR (reducción de acetileno) (Bleeker, Hakvoort, Blick, Souer, & Schat, 2006). En presencia de As (V) la actividad AR aumenta en paralelo a la duración con una correlación positiva significativa con las PC ( $p < 0.001$ ). Por lo tanto, un aumento en AR contrarresta la toxicidad por la reducción de As (V) y la quelación con GSH y PC (Srivastava, Mirshra, Dwivedi, & Tripathi, 2010).

#### **3.6.1.2. Cadmio (Cd)**

La concentración de Cd en el tejido fue máxima (13,71 mol/g) a una concentración de fondo de 25 M, durante 168 h. A esta concentración, se encontró una disminución de aproximadamente 79 y 72 % en el contenido de clorofila y proteína. La actividad in vivo de nitrato reductasa se estimuló a 1,0 M; sin embargo, la actividad disminuyó gradualmente más allá de esta concentración (Garg, Tripathi, Rai, Sinha, & Chandra, 1997). Estos resultados muestran un alto potencial de acumulación de Cd, en comparación con otras plantas estudiadas. La capacidad hiperacumuladora de cadmio del macrófito está asociada con la inducción de los péptidos quelantes de metales, las fitoquelatinas (PC), para hacer frente a los altos niveles de Cd celular (Tripathi, Rai, Gupta, & Chandra, 1996).

#### **3.6.1.3. Mercurio (Hg)**

Presentó alto nivel de tolerancia, con crecimiento similar a la planta control en un medio que contenía Hg (5.0 µM) durante 168 h. La reducción de clorofila, proteínas y cisteína se evidenciaron a partir de concentraciones de 1.0 µM. La variación se estableció como no significativa (Gupta & Chandra, 1996 ).

#### **3.6.1.4. Plomo (Pb)**

A pesar de que el mecanismo de acumulación no está definido, generalmente en las plantas macrófitas, los metales pueden quedar atrapados por las cargas negativas de las paredes celulares, compartimentarse a órganos no funcionales (como vacuolas), y/o ser transportados al citoplasma celular (Hall, 2002).

### **3.7. *Hydrilla verticillata* EN SAN PEDRO LA LAGUNA, SOLOLÁ**

En la actualidad se ha evidenciado el desplazamiento de *Hydrilla verticillata* a cuerpos acuáticos de América, Europa, África y Australia. Entre sus principales métodos de migración está el transporte de fragmentos por lanchas, barcos o motos acuáticas ya sea por actividades turísticas, comerciales o de recreación de un cuerpo acuático a otro; otra ruta de transporte de la planta es por su uso en acuarios ornamentales y el mantenimiento inadecuado de estos, sobre todo

el descarte de fragmentos de *Hydrilla* en tuberías que se dirigen a cuerpos acuíferos (MARN, 2003). Aún se desconoce la ruta exacta de introducción en América, en 1950 fue detectada por primera vez en los Estados Unidos, por su uso como ornamento para acuarios. En 1980 surgió como problema ambiental en México y en 1990 se observó por primera vez en estanques aislados de Guatemala. En el año 2000 se da a conocer el primer reporte sobre la presencia de *Hydrilla* en el Lago de Izabal en un estudio orientado a evaluar los impactos del Huracán Mitch y se considera que su aparición también está asociada a una introducción accidental o a un descarte inadecuado de los desechos de acuarios (Binimelis, Monterroso & Rodríguez, 2007; Tribunal Centroamericano de Agua, 2004).

En el diagnóstico ecológico-social de la cuenca de Atitlán, emitido en 2003, se muestra en la distribución y los cambios de las macrófitas acuáticas de la zona litoral y limnética del Lago de Atitlán, la presencia de *Hydrilla verticillata*, con dos focos de crecimientos localizados en el muelle en San Juan la Laguna y en San Lucas Tolimán, en donde se considera su potente propagación por el paso de lanchas motorizadas (Dix, Fortín, Mdinilla, Ríos, 2003).

El estudio sobre la caracterización y distribución de las macrófitas acuáticas del Lago de Atitlán y su relación con los niveles de contaminación, identifica en 2006, la presencia de *Hydrilla verticillata* en Panajachel, Santa Catarina, San Antonio Palopó, San Lucas Tolimán, Isla de los Gatos, Santiago Atitlán, San Pedro, San Juan, San Pablo y Santa Cruz, con una población densa y visiblemente extensa, sobre todo en la época de invierno, considerando su difusión y proliferación como producto del aumento de transporte acuático utilizado para la movilización de poblaciones, recreación y pesca. Este transporte posee hélices que podan y esparcen trazas de planta, fomentando su propagación, siendo así la especie sumergida con mayor población (Ríos, 2007). En el informe de vegetación acuática en el Lago de Atitlán realizada en 2015, se identificó la presencia de *Hydrilla verticillata* en los mismos puntos anteriormente mencionados y dos nuevos sitios que son Cerro de Oro y Río Quiscab, siendo esta la única especie

que se registró en todos los sitios de muestreo. Además del aumento de transporte acuático, el Lago de Atilán se ha visto afectado por crecimiento descontrolado de *Hydrilla*, causado por la extracción inadecuada que favorece la proliferación de la planta (AMSCLAE, 2015). Esta planta tiene un rol significativo en el mantenimiento de la estructura y de las propiedades funcionales de los cuerpos acuáticos, pues puede otorgar distintos nutrientes como alimento para la fauna acuática y puede llegar a ser un refugio para una diversidad de organismos como peces, invertebrados y aves acuáticas (Pelicice, Agostinho, & Thomaz, 2005). También, tiene la capacidad de captar y acumular metales pesados como arsénico, cadmio, cobre y cromo de aguas contaminadas (Holaday & Bowes, 1980).

Sin embargo, el exceso de la planta puede alterar los niveles de oxígeno disuelto y químicos en los ecosistemas acuáticos, por lo que delimita la existencia de otras especies macrófitas y animales, a su vez, estropea el transporte acuático, actividades de pesca y uso recreativo. Por lo que existen zonas en donde es de gran importancia la remoción de la misma, especialmente en sitios de servidumbre, como zonas cercanas a los muelles o zonas de alto tráfico de lanchas y de turismo, por esto, la población se ve en la necesidad de realizar limpiezas de *Hydrilla* (Pesacreta, 1988 & Madsen, 1997).

*Figura 9. Extracción de Hydrilla verticillata en la playa del Cantón Tza'ñ Kaqajaay, San Pedro la Laguna, Sololá*



Fuente: (Díaz, Barillas, Sandoval, & Cojon, 2018)

La limpieza de *Hydrilla* se realiza generalmente sin tomar en cuenta alguna técnica de corte específica que ayude a controlar la proliferación de la planta, promoviendo el crecimiento en exceso, agravando la situación. El material extraído de estas zonas tampoco recibe un tratamiento adecuado o se ha aprovechado de alguna forma, quedando almacenado en las orillas de las playas, generando lodos, mal olor, focos de contaminación microbiológica, contaminación visual, problemas de transporte y actividades recreativas (Díaz, Barillas, Sandoval, & Cojon, 2018).

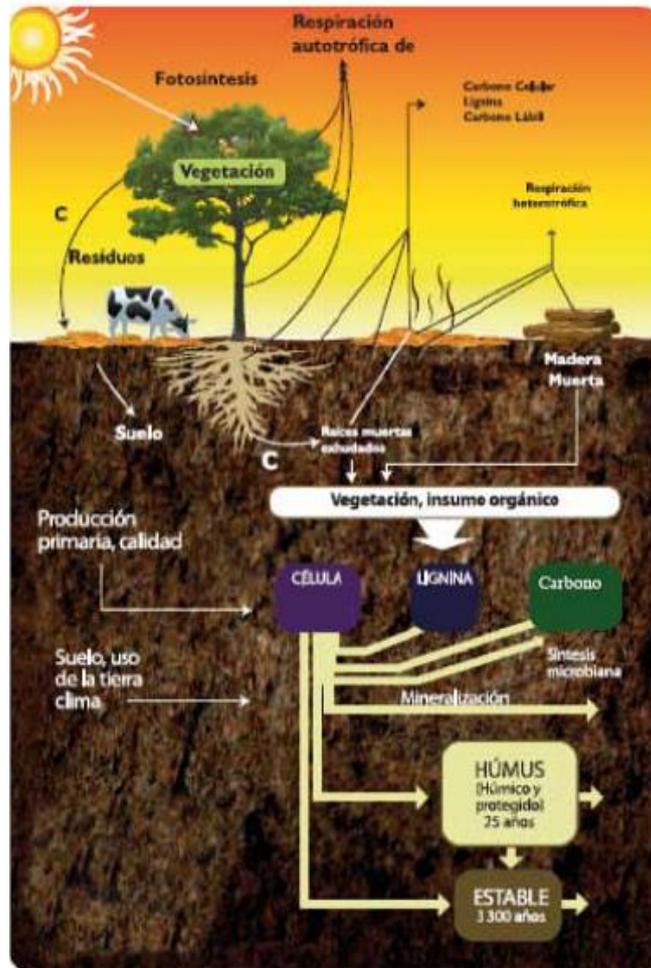
San Pedro la Laguna es uno de los municipios con la mayor repercusión por el crecimiento y la acumulación de esta planta, sobre todo por los vientos que dirigen las corrientes de agua hacia las playas de este municipio, arrastrando distintos tipos de contaminantes, entre ellos desechos sólidos, como plásticos y grandes masas de *Hydrilla* muerta. Una de las comunidades de este municipio más afectadas por la acumulación de desechos en playas es la población del cantón Tza'n Kaqajaay, quienes se organizan para realizar campañas de extracción de *Hydrilla*, regularmente llevada a cabo por las mujeres y pescadores del lugar. La limpieza generalmente se enfoca en la extracción de los restos de la planta muerta, y es llevada a la orilla de la playa, en donde se seca, descompone y se acumula sin tener una estrategia de aprovechamiento y control de la planta, provocando mayor contaminación. Por esto, es importante desarrollar mecanismos adecuados para su control y aprovechamiento. Parte de la estrategia para contrarrestar esta problemática, La Municipalidad de San Pedro ha propuesto el aprovechamiento de los residuos de *H. verticillata* como materia prima para el desarrollo de compost, en la planta de tratamientos de esta. (Díaz, Barillas, Sandoval, & Cojon, 2018).

### 3.7.1. COMPOSTAJE

El compostaje es la descomposición de sustratos orgánicos, bajo condiciones controladas que genera un producto final que es estable, libre de patógenos y rico en nutrientes (Sylvia, Fuhrmann, Hartel, & Zuberer, 1998). Los principales objetivos del compostaje son estabilizar materia orgánica putrescible, facilitar el manejo del suelo, aumentar la capacidad de retención de humedad del suelo, reducir el riesgo de erosión, reducir la evaporación del agua, conservar y aportar nutrientes (macronutrientes y micronutrientes), mejorar la capacidad de intercambio de cationes, aportar carbono para mantener la biodiversidad de la micro y macrofauna, para ello debe ser un producto uniforme y relativamente seco conveniente para usar como acondicionador de suelo y suplemento para jardines o para disponer en tierra (Román, Martínez, & Pantoja, 2013).

En el compostaje, la materia orgánica pasa por un proceso de descomposición, en el que diferentes microorganismos en presencia de oxígeno aprovechan metabólicamente el nitrógeno (N) y el carbono (C) presentes para producir su propia biomasa (como se muestra en la figura 9). En este proceso, adicionalmente, los microorganismos generan calor y un sustrato sólido, con menos C y N, pero estable. El compost, no solo depende de los microorganismos del suelo, sino que también del tipo de suelo, la vegetación, las condiciones ambientales como humedad y temperatura. El incremento de lluvias o riego, y en condiciones de temperatura media, los microorganismos se multiplican, consumen más materia orgánica y la descomposición es continua (Román, Martínez, & Pantoja, 2013).

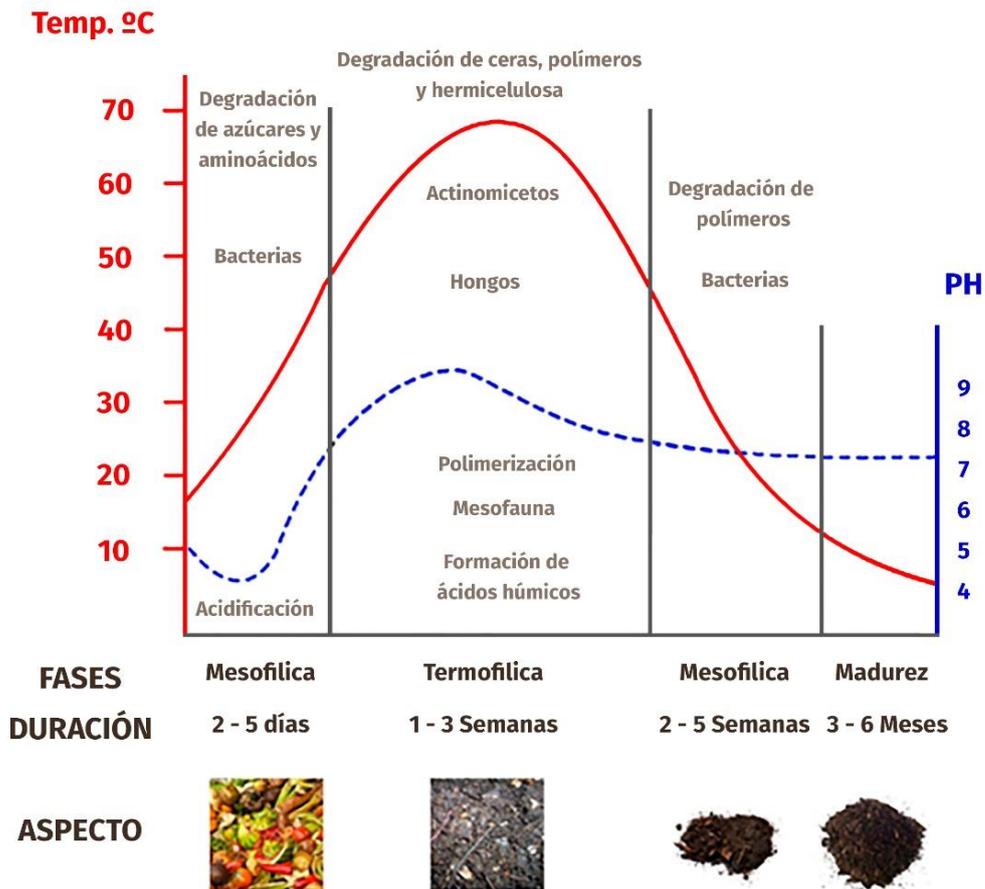
Figura 10. Ciclo de Nutrientes en el ambiente



Fuente: (Martinez, Gutierrez, & Novo, 2011)

Al descomponer el C, el N y la materia orgánica inicial, los microorganismos desprenden calor medible a través de las variaciones de temperatura a lo largo del tiempo. Según la temperatura generada durante el proceso, se reconocen tres etapas principales del compostaje; fase mesófila (La temperatura aumenta a 45 °C pues la actividad microbiana genera calor), fase termófila (La temperatura será mayor a 45 °C, pues los microorganismos que se desarrollan a temperaturas medias, son reemplazados por aquellos que crecen a mayor temperatura) y la fase de enfriamiento (Agotadas las fuentes sencillas de N y C, la temperatura desciende de 40 - 45 °C, en esta fase se degradan polímeros como celulosa). Además, se toma en cuenta la fase de maduración que se da a temperatura ambiente, durante la cual se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización para la formación de ácidos húmicos y flúvicos, como se muestra en la figura 10 (Román, Martínez, & Pantoja, 2013).

Figura 11. Temperatura, oxígeno y pH en el proceso de compostaje



Fuente: (Román, Martínez, & Pantoja, 2013)

Ya que el compostaje es un proceso biológico llevado a cabo por microorganismos, se deben tener en cuenta los parámetros que afectan su crecimiento y reproducción. Estos factores incluyen el oxígeno o aireación, la humedad del sustrato, temperatura, pH y la relación C:N. Externamente, el proceso de compostaje dependerá en gran medida de las condiciones ambientales, el método utilizado, las materias primas empleadas, y otros elementos, por lo que algunos parámetros pueden variar. No obstante, éstos deben estar bajo vigilancia constante para que siempre estén dentro de un rango óptimo. A continuación, se señalan los parámetros y sus rangos (tabla 6) (Román, Martínez, & Pantoja, 2013).

Tabla 6. Parámetros del compostaje

Parámetro	Rango ideal al comienzo (2-5 días)	Rango ideal para compost en fase termofílica (2-5 semanas)	Rango ideal de compost maduro (3-6 meses)
C:N	25:1 - 35:1	15/20	10:1 – 15:1
Humedad	50% - 60%	45% - 55%	30% - 40%
Concentración de oxígeno	~10%	~10%	~10%
Tamaño de partícula	<25 cm	~15 cm	< 1.6 cm
pH	6.5 – 8.0	6.0 – 8.5	6.5 – 8.5
Temperatura	45 – 60°C	45°C – Temperatura ambiente	Temperatura ambiente
Densidad	250 -400 kg/m <sup>3</sup>	<700 kg/m <sup>3</sup>	<700 kg/m <sup>3</sup>
Materia orgánica (Base seca)	50% - 70%	>20%	>20%
Nitrógeno Total (Base seca)	2.5% - 3.0%	1.0% - 2.0%	~1.0%

Fuente: (Román, Martínez, & Pantoja, 2013)

Los nutrientes en el suelo se dividen en macro- y micro- nutrientes, en función de las cantidades que la planta necesite. Los macronutrientes primarios son Nitrógeno, Fósforo y Potasio, y los secundarios son Magnesio, Azufre y Calcio. Los micronutrientes son requeridos en cantidades muy pequeñas, pero generalmente son importantes para el metabolismo vegetal y animal. Estos son el hierro, el zinc, el manganeso, el boro, el cobre, el molibdeno y el cloro. El contenido en nutrientes del compost tiene una gran variabilidad, ya que depende de los materiales de origen (Sánchez, F., 2011).

*Tabla 7. Elementos esenciales para el desarrollo de las plantas, símbolos, formas de absorción y composición aproximada en las plantas*

Elemento	Símbolo	Forma de Absorción	% en Planta
Carbón	C	CO <sub>2</sub>	40 – 50
Oxígeno	O	O <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> O	42 – 44
Hidrógeno	H	H <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> O	6 – 7
Nitrógeno	N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> y NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1 – 3
Fósforo	P	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> y HPO <sub>4</sub>	0.05 – 1
Potasio	K	K <sup>+</sup>	0.3 - 3
Calcio	Ca	Ca <sub>2</sub> <sup>+</sup>	0.5 – 3.5
Magnesio	Mg	Mg <sub>2</sub> <sup>+</sup>	0.03 - 0.8
Azufre	S	SO <sub>4</sub>	0.1 – 0.5
Hierro	Fe	Fe <sub>2</sub> <sup>+</sup>	100 – 1000 ppm
Manganeso	Mn	Mn <sub>2</sub> <sup>+</sup>	50 – 300 ppm
Cobre	Cu	Cu <sub>2</sub> <sup>+</sup>	10 – 40 ppm
Zinc	Zn	Zn <sub>2</sub> <sup>+</sup>	10 – 20
Boro	B	H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	50 – 300 ppm
Molibdeno	Mo	MoO <sub>4</sub>	10 – 40 ppm
Cloro	Cl		
Sodio	Na		

Fuente: (Sánchez, F., 2011)

### 3.7.2. MATERIAL COMPOSTABLE

Para elaborar abono orgánico, se emplean materiales que pueden ser sometidos a un proceso biológico controlado de descomposición (EGMASA, 2000), los cuales pueden provenir de desechos de cocina, hojas de árboles, entre otras, como se describe a continuación:

- a. Material verde: Son plantas verdes (no maduras) que se pueden incluir como restos de cosecha, plantas de huerto o jardín, la poda de árboles, heno y hierba. Así mismo, incluyen desperdicios de cocina.
- b. Materia orgánica: Restos de cocina (frutas y hortalizas). Alimentos estropeados o caducados. Cáscara de huevo, restos de café, té e infusiones, cáscara de naranja, cítricos o piña, entre otros.

- c. Materia seca: Plantas secas (maduras) como cereales, granos y paja.
- d. Estiércoles: porcino, vacuno, caprino y ovino principalmente.
- e. Aceites y grasas comestibles (en baja proporción)
- f. Papel: Servilletas, hojas (material de escritorio), cartón (no impreso, coloreado o mezclado con plástico).
- g. Cortes de pelo (no teñido) y residuos de esquilado de animales.

No se deben incluir materiales inertes, tóxicos o nocivos tales como:

- a. Residuos químicos-sintéticos, pegamentos, solventes, gasolina, petróleo.
- b. Materiales no degradables (vidrio, metales, plásticos).
- c. Aglomerados o contrachapados de madera (ni sus virutas o serrín)
- d. Tabaco, por el contenido potente de biocida como la nicotina y otros componentes tóxicos.
- e. Detergentes, productos clorados, antibióticos, residuos de medicamentos.
- f. Animales muertos (estos deben ser incinerados en condiciones especiales, pueden ser compostados en pilas especiales).
- g. Restos de alimentos cocinados, como carnes.

(Román, Martínez & Pantoja, 2013)

El contenido en nutrientes del compost tiene una gran variabilidad, ya que depende de los materiales de origen. Para la toma de decisiones a la hora de aplicar compost como fertilizante orgánico, así como para aplicarlo en nutrición integrada con fertilizantes minerales, se debe tener en cuenta:

- Necesidades del cultivo en cuanto a fertilización (análisis de suelo y foliares)
- Acceso y disponibilidad de ambos fertilizantes localmente
- Costes de ambos fertilizantes
- Necesidad de materia orgánica del suelo

(Román, Martínez, & Pantoja, 2013)

Cada cultivo necesita una cantidad específica de nutrientes, y esta cantidad depende en parte del rendimiento esperado del cultivo. Para calcular el requerimiento real de fertilizantes se debe tener en cuenta otros factores tales como las reservas de nutrientes del suelo, y la inmovilización o pérdida del nutriente cuando se aplica, ya sea por fijación o lixiviación (Román, Martínez, & Pantoja, 2013).

*Tabla 8. Contenido nutricional del material compostable.*

<b>Materiales</b>	<b>MO (%)</b>	<b>C (%)</b>	<b>N (%)</b>	<b>C/N</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (%)</b>	<b>K<sub>2</sub>O (%)</b>
<b>Algodón (Semillas)</b>	95.62	54.96	4.58	12/1	1.42	2.37
<b>Aserrín fresco</b>	30.68	16.32	0.96	17/1	0.08	0.19
<b>Banano (hojas)</b>	88.89	49.02	2.58	19/1	0.19	n/d
<b>Café (Cáscara)</b>	90.46	50.60	2.30	22/1	0.42	1.26
<b>Cebada (salvado)</b>	95.07	51.30	5.13	10/1	1.30	0.15
<b>Cacao (Cáscara)</b>	91.10	51.84	3.24	16/1	1.45	3.74
<b>Estiércol de cerdo</b>	53.10	29.50	1.86	16/1	1.06	2.23
<b>Estiércol de aves</b>	52.21	29.01	2.76	11/1	2.07	1.67
<b>Estiércol caprino</b>	30.00	17.40	2.70	6/1	1.78	2.90
<b>Estiércol de conejo</b>	35.00	20.30	2.00	10/1	1.33	1.20
<b>Estiércol de equino</b>	96.19	25.50	1.67	18/1	1.00	1.19
<b>Frijol canavalia</b>	88.54	48.45	2.55	19/1	0.50	2.41
<b>Gandul</b>	55.90	52.49	1.81	29/1	0.59	1.14
<b>Higo</b>	92.20	54.40	5.44	10/1	1.91	1.54
<b>Soja</b>	78.40	45.92	6.56	7/1	0.54	1.54

MO: materia orgánica, C: Carbono, N: nitrógeno, C/N: relación carbono/nitrógeno, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: óxido fosfórico, K<sub>2</sub>O: óxido de potasio

Fuente: (Román, Martínez, & Pantoja, 2013)

### **3.7.3. TÉCNICAS DE COMPOSTAJE**

Los factores claves a la hora de decidir una técnica son:

- Tiempo de proceso.
- Requisitos de espacio.
- Seguridad higiénica requerida.
- Material de partida (ausencia o presencia de material de origen animal).
- Condiciones climáticas del lugar

Las diferentes técnicas por requisito de espacio se dividen generalmente en sistemas cerrados y sistemas abiertos. Los sistemas abiertos son aquellos que se hacen al aire libre, y los cerrados los que se hacen en recipientes o bajo techo (COMSA, 2015).

- a. Sistema abierto o en pilas:** Cuando hay una cantidad abundante y variada de residuos orgánicos ( $\geq 1 \text{ m}^3$ ), se puede llevar a cabo diversas técnicas de formación de pilas como el método indio Indore o el compostaje rural chino (FAO, 2003). Todas las metodologías tienen en común la alternancia de capas de distinto material con el fin de conseguir una adecuada relación C:N (30:1) y el control de temperaturas y humedad (COMSA, 2015).
- b. Sistema cerrado o en recipiente:** Es frecuentemente usado a nivel familiar. Tiene una serie de características que favorecen su replicación: evita la acumulación de lluvia, protege al material de vientos fuertes, facilita las labores de volteo, facilita la extracción de lixiviado, controla la invasión de vectores (ratones, aves), y evita el acceso al material en descomposición por personal no autorizado y animales de la finca. La desventaja de este método es que puede alcanzar altas temperaturas, por lo que el control de los parámetros cobra especial relevancia. En climas cálidos, se suele adicionar tierra al recipiente (hasta un 10%) que hace de regulador de la temperatura, ya que la tierra es estable y no genera calor (COMSA, 2015). Las diferentes técnicas por material de descomposición de partida se dividen en: tratamientos usando microorganismos de montaña, vermicompost (lombrices), material orgánico, entre otros (COMSA, 2015).
- a. Microorganismos de montaña:** Los microorganismos de montaña son hongos, bacterias, micorrizas, levaduras y otros organismos benéficos, que viven y se encuentran en el suelo de montañas, bosques, parras de bambú, lugares sombreados y sitios donde en los últimos tres años no se han utilizado agroquímicos. Estos microorganismos habitan y se desarrollan en un ambiente natural. En el suelo se reconocen fácilmente por la formación de micelios blancos debajo de la hojarasca (COMSA, 2015).
- b. Vermicompost:** Es producto de las excretas de las lombrices. Usualmente se utilizan lombrices llamadas La coqueta roja o lombriz californiana (*Eisenia foetida*). Las lombrices son capaces de transformar en abono,

restos de comida, papel, vegetales, etc., los cuales en un periodo entre 15 a 30 días han producido un abono orgánico con características organolépticas y valor nutricional óptimas (COMSA, 2015).

- c. **Materia orgánica:** el compost producido por esta técnica se da por la fermentación de materiales orgánicos. Dicho proceso se origina a partir de una intensa actividad microbiológica, donde los materiales orgánicos utilizados son transformados en minerales, vitaminas, aminoácidos, enzimas, ácidos orgánicos (fúlvicos y húmicos) entre otras sustancias metabólicas (COMSA, 2015).

### **3.7.4. ANÁLISIS DE INOCUIDAD DEL COMPOST**

#### **3.7.4.1. Coliformes termotolerantes (denominados también fecales)**

Se denominan coliformes termotolerantes a un grupo de bacterias Gram negativas perteneciente a las enterobacterias capaces de fermentar lactosa y producir indol a 44,5°C. De acuerdo a la EPA10 la presencia de este grupo en un alto número es un posible indicador de la presencia de bacterias patógenas como *Salmonella*, *Shigella* y *E. coli* verotoxigénicas. También su presencia en concentraciones altas en un compost o material orgánico indica que el proceso térmico ha sido insuficiente o deficiente. Se ha establecido que recuentos por debajo de 1.000 ufc por gramo de peso seco del compost significa que los patógenos entéricos han sido destruidos (Carrascal, et al., 2011).

#### **3.7.4.2. Bacterias patógenas**

En materias primas como estiércoles, pueden encontrarse bacterias patógenas para humanos y animales, siendo de especial interés *Salmonella*, uno de los principales agentes de enfermedades transmitidas por alimentos y puede ser habitante del tracto digestivo de animales que, como aves, bovinos, porcino, etc (Carrascal, Castañeda , & Pulido, 2011). Por otro lado, *E. coli*, es asociado a enfermedades causadas por consumo de frutas y vegetales no pasteurizados (Islam, Doyle, Phatak, Millner, & Jiang, 2005). Tiene como reservorios animales

como, ganado vacuno, ciervos y ovejas, y puede sobrevivir hasta 70 días en el estiércol. Otros patógenos encontrados en compost son: *Clostridium perfringens*, *Listeria m.*, *Bacillus cereus* y *Cryptosporidium parvum* (Beuchat, 2006).

### 3.7.4.3. Metales pesados

Los metales pesados constituyen un grupo de elementos químicos no deseados, debido a que no se descomponen (solo cambian de estado de oxidación). Tienen efectos negativos en la salud humana, y un impacto en la cadena trófica a nivel terrestre y acuático. Aunque se encuentran en la naturaleza, cuando la concentración supera límites definidos, puede acumularse en tejidos vegetales (fruta, raíz) o en órganos vitales (hígado, cerebro, tejido graso) con efectos generalmente crónicos. En compost, estos materiales, junto con la presencia de patógenos, son considerados para definir la calidad del material. Los límites varían según los países, aunque se tiene como referente el marco de normativa propuesto por la EPA y por la Unión Europea (EU) (Rosal, Pérez, & Arcos, 2007).

### 3.7.5. NORMA NTC 5167 NORMA TÉCNICA COLOMBIANA

la Norma Técnica Colombiana NTC 5167 es un importante referente para fertilizantes y acondicionadores del suelo, estableciendo los requisitos que deben cumplir los ensayos a los que deben ser sometidos los productos orgánicos susceptibles a ser usados en agricultura (abonos, enmiendas o acondicionadores de suelo). La norma especifica los siguientes parámetros para los metales de interés en la investigación (ICONTEC, 2011):

*Tabla 9. Límite máximo permisible de As, Cd, Hg y Pb según la Norma NTC 5167*

<b>Parámetro</b>	<b>Límites máximos</b>	<b>Unidades</b>
Arsénico	41	mg/Kg
Cadmio	39	mg/Kg
Mercurio	17	mg/Kg
Plomo	300	mg/Kg

Fuente: (ICONTEC, 2011)

### **3.7.6. NORMAS DEL CONSEJO CATALÁN DE LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA ECOLÓGICA CCPAE-, VERSIÓN 17-10-2003.**

Las Normas del CCPAE establecen que a pesar de que los metales pesados y otros elementos metálicos están presentes de forma natural en el suelo y algunos son esenciales, como elementos traza, para las plantas y animales; es necesario mantener un equilibrio correcto y su concentración en el suelo no debe incrementarse por encima de niveles aceptables por medio de la aplicación de abonos orgánicos y minerales ricos en estos elementos, o de fungicidas a base de cobre. En los apartados 05.05 y 05.06 de esta norma, en su versión 17-10-2003, se indican los niveles máximos permitidos de metales pesados para determinados abonos y plaguicidas autorizados en agricultura ecológica, en donde se especifica que para la comercialización de productos que hagan referencia a la agricultura ecológica cultivados en suelos, los niveles de metales pesados deben estar por debajo de las siguientes cantidades máximas (CCPAE, 2003):

*Tabla 10. Límite máximo permisible de Cd, Hg y Pb según las Normas del CCPAE, versión 17-10-2003*

<b>Parámetro</b>	<b>Límites máximos</b>	<b>Unidades</b>
Cadmio	2	mg/Kg
Mercurio	1	mg/Kg
Plomo	100	mg/Kg

Fuente: (CCPAE, 2003)

### **3.7.7. ACUERDO GUBERNATIVO No. 236-2006 de la REPÚBLICA DE GUATEMALA.**

Artículo 41. Disposición final. Se permite efectuar la disposición final de lodos, por cualesquiera de las siguientes formas:

- 3.8. Aplicación al suelo: acondicionador, abono o compost
- 3.9. Disposición en rellenos sanitarios
- 3.10. Confinamiento o aislamiento
- 3.11. Combinación de las antes mencionadas

(Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2006)

Artículo 42. Parámetros y límites máximos permisibles para lodos. Para poder efectuar la disposición final de lodos de acuerdo con las formas descritas en el artículo 41 del presente reglamento, los valores de sus propiedades fisicoquímicas no deben exceder los límites máximos permisibles descritos en el siguiente cuadro:

*Tabla 11. Límite máximo permisible de As, Cd, Hg y Pb según el acuerdo gubernativo No. 236-2006 de Guatemala*

<b>Parámetro</b>	<b>Dimensional</b>	<b>Aplicación al suelo</b>	<b>Disposición en rellenos sanitarios</b>	<b>Confinamiento o aislamiento</b>
Arsénico	mg/Kg	50	100	>100
Cadmio	mg/Kg	50	100	>100
Mercurio	mg/Kg	25	50	>50
Plomo	mg/Kg	500	1000	>1000

Fuente: (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2006)

Los expresados en el cuadro anterior son los límites máximos permisibles para suelos con potencial de hidrógeno menor que siete unidades. En los suelos que posean potencial de hidrógeno mayor o igual que siete unidades se podrán disponer lodos hasta una cincuenta por ciento más de los valores presentados como límites máximos permisibles (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2006).

Artículo 43. Aplicación al suelo. Los lodos que presenten metales pesados y que se ajusten a los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 42, podrán disponerse como acondicionador del suelo, en cuyo caso se permitirá disponer hasta doscientos mil kilogramos por hectáreas por año. En caso de que la aplicación como abono se permitirá disponer hasta cien mil kilogramos por hectárea por año (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2006).

### 3.11.1. *Hydrilla verticillata* COMO COMPOST

El compost es un producto obtenido a partir de diferentes materiales biodegradables, los cuales son sometidos a un proceso biológico controlado de oxidación denominado compostaje, en el que se utilizan organismos microscópicos (generalmente bacterias y hongos) y macroscópicos (lombrices de tierra, hormigas, caracoles, babosas, milpiés, cochinillas, etc.) que generan las condiciones favorables para la descomposición, aprovechamiento y optimización de los componentes de la materia a compostar. Posee un aspecto terroso, libre de olores y patógenos. Es empleado como abono y como sustituto parcial o total de fertilizantes sintéticos. Es utilizada en agricultura y jardinería para enmienda del suelo; se usa en paisajismo, control de la erosión, recubrimientos y recuperación de suelos (EGMASA, 2000).

*Hydrilla verticillata* contiene una amplia variedad de nutrientes químicos, beta-carotenos, abundantes minerales polisacáridos trans, aminoácidos, antioxidantes, micro y macro nutrientes (Ver anexo 1) (Best & Boyd, 1996), teniendo así un gran potencial productivo para la producción de abono orgánico. Tomando en cuenta estas características y la necesidad del aprovechamiento de esta planta, la Municipalidad de San Pedro utiliza esta planta como parte de la producción de abono orgánico. En 2018, el equipo EPSUM-AMSCLAE realizó el estudio de distintos métodos de compostaje a base de *Hydrilla*, analizando las propiedades fisicoquímicas, microbiológicas y su efectividad bajo diferentes tratamientos, como con el uso de microorganismos de montaña, vermicompost y con material orgánico en las áreas de servidumbre de Tza'n Kaqajaay, San Pedro la Laguna, Sololá. Esto se llevó a cabo tras el análisis del terreno disponible y el volumen a manejar, utilizando así un sistema giratorio de compostaje. Se establecieron seis tratamientos de compostaje, utilizando como materia prima los residuos de *Hydrilla verticillata* depositadas en la orilla de la playa. Tres incluyeron residuos picados de la planta y tres, residuos sin picar. A cada uno se agregó rastrojo de gramíneas, suelo y broza en diferentes proporciones. Por último, se evaluó la acción de tres activadores diferentes:

microorganismos en materia orgánica, microorganismos de montaña y lombrices de tierra. El material por compostar fue seleccionado considerando la disponibilidad y accesibilidad en el municipio de San Pedro la Laguna, Sololá. Asimismo, las porciones se calcularon en base a la proporción carbono:nitrógeno (C:N) de los materiales y la capacidad volumétrica máxima de los contenedores, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 12 Componentes de los 6 tipos de compost elaborados y analizados

Tratamiento	Material	Cantidad (cubetas)
MO-E	Residuos de <i>Hydrilla</i>	3
	Suelo	0.5
	Broza	0.5
	Rastrojo de gramíneas	0.5
	Materia orgánica de cocina	4
MO-F	Residuos de <i>Hydrilla</i>	4
	Suelo	0.5
	Broza	0.5
	Rastrojo de gramíneas	0.5
	Materia orgánica de cocina	3
LC-E	Residuos de <i>Hydrilla</i>	5
	Suelo	0.5
	Broza	1
	Rastrojo de gramíneas	0.5
	Lombrices de tierra	0.25
LC-F	Residuos de <i>Hydrilla</i>	4
	Suelo	0.5
	Broza	1
	Rastrojo de gramíneas	0.5
	Lombrices de tierra	0.25
MM-E	Residuos de <i>Hydrilla</i>	4
	Suelo	0.5
	Broza	1
	Rastrojo de gramíneas	0.5
	Microorganismos de montaña	1
MM-F	Residuos de <i>Hydrilla</i>	5
	Suelo	0.5
	Broza	1
	Rastrojo de gramíneas	0.5
	Microorganismos de montaña	1

MO: materia orgánica, LC: lombricompost, MM: microorganismos de montaña. Terminación -E: *H. verticillata* entera. Terminación -F: *H. verticillata* fraccionada.  
Fuente: datos obtenidos del laboratorio del DICA, AMSCLAE.

El análisis fisicoquímico del compostaje midió temperatura, humedad, pH, nitrógeno total (N), carbono orgánico (CO), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), hierro (Fe), Manganeseo (Mn) y zinc (Zn), cuantificados por absorción atómica. El análisis microbiológico incluyó la evaluación del comportamiento de los grupos descomponedores por medio del recuento en las etapas mesófila y final del compostaje. Los resultados se resumen en la siguiente tabla 12, que a continuación se presenta:

*Tabla 13 Análisis fisicoquímico de los prototipos de compost a base de H. verticillata*

		MO-E	MO-F	LC-E	LC-F	MM-E	MM-F
	<b>pH</b>	9.0	9.3	8.1	7.7	8.4	7.8
	<b>C.E. (mS/cm)</b>	9.22	10.30	7.49	9.9	7.76	9.41
<b>%</b>	<b>P</b>	0.10	0.18	0.09	0.08	0.09	0.09
	<b>K</b>	0.68	0.75	0.60	0.59	0.55	0.51
	<b>Ca</b>	0.69	0.75	0.69	0.81	0.69	0.69
	<b>Mg</b>	0.11	0.14	0.11	0.11	0.10	0.10
	<b>Na</b>	1 050.00	1 350.00	950	750	850	850
<b>ppm</b>	<b>Cu</b>	10	10	10	10	10	10
	<b>Zn</b>	50	75	30	30	40	30
	<b>Fe</b>	2 250.00	2 725.00	1 250.00	2 375	2 600.00	2 200.00
	<b>Mn</b>	185	210	185	185	185	180
<b>%</b>	<b>CO</b>	3.90	4.21	3.66	4.13	3.35	4.45
	<b>NT</b>	0.59	0.59	0.49	0.65	0.59	0.57
	<b>C:N</b>	6.9:1	7.1:1	7.4:1	6.4:1	5.7:1	7.8:1

Por debajo de los límites permisibles

Entre los límites permisibles

Por encima de los límites permisibles

#: porcentaje. ppm: partes por millón. C.E: conductividad eléctrica. P: Fósforo. K: potasio. Ca: Calcio. Mg: Magnesio. Na: Sodio. Cu: cobre. Zn: Zinc. Fe: Hierro. Mn: Manganeseo. CO: carbono orgánico. NT: nitrógeno total. C:N; relación Carbono-Nitrógeno.

Fuente: Análisis en Laboratorio de suelo-planta-agua "Salvador castillo Orellana" de la facultad de agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala, informe emitido el 13 de febrero de 2019 con código #000315, (Díaz, Barillas, Sandoval, & Cojon, 2018).

Los resultados muestran las características generales de los seis prototipos de compost a base de *Hydrilla verticillata*. Basado en esto, se reconoce que el orden descendente de eficiencia es el siguiente:

MM-F > CL-E > CL-F > MM-E > MO-E > MO-F

A pesar de que el tratamiento con microorganismos de montaña e *H. verticillata* picada posee mejores resultados, es importante destacar que todos los tratamientos presentaron niveles por debajo y por encima de los límites permisibles de distintos parámetros, lo cual indica la necesidad de la regularización estos, disminuyendo o aumentando las proporciones de los diferentes componentes.

Los compost que mostraron una tendencia de bajos niveles fueron: fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y en la relación carbono/nitrógeno (C:N). Para los tres primeros es posible regularlo agregando materiales ricos en estos elementos, como desechos de banano, albaricoques (ricos en Mg), brócoli, coliflor (ricos en Ca), brócoli, zanahorias (ricos en P), entre otros. En cuanto a la relación C:N en los seis prototipos indica que en los tratamientos existe un exceso de nitrógeno, pues los valores ideales de un compost maduro oscilan entre 10:1 - 15:1 (Román, Martínez, & Pantoja, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO): Manual de compostaje, 2013), mientras que los valores experimentales se mantuvieron en un rango de 5.7:1 - 7.8:1, siendo MM-E el que presenta la menor relación C:N y MM-F el que presenta mayor relación C:N. Al haber un exceso de nitrógeno, este se pierde en forma de amoníaco, por lo que tiende a calentarse y el proceso se da de forma acelerada.

Por otro lado, los compost que mostraron una tendencia de niveles por arriba del límite permisible fueron: sodio (Na), hierro (Fe) y manganeso (Mn). Los niveles de Na rondaron entre 750 % (LC-F) y 1,350 % (MO-F). Los seis tratamientos presentaron concentraciones superiores al rango establecido para cultivos de hoja, el cual tiene un rango de 0.01 a 0.20 %. Este exceso de sodio, puede deberse a que la *Hydrilla verticillata* se ha clasificado como una planta bioacumuladora (Guillizoni, 1991), la cual adquiere este elemento tanto por el suelo característico de Atitlán, que tiene de mediana a alta capacidad de retención de bases intercambiables, entre ellas, el (MAGA, 2013), como por el uso de detergentes y blanqueadores empleados por las comunidades alrededor del lago, que implica la entrada de 2,663.04 Kg/año de Tripolifosfato de Sodio y 315.32 Kg/año de Hipoclorito de Sodio (Romero, 2013). Al utilizarlo como abono, se puede ocasionar la acumulación de cationes citotóxicos provenientes de metales alcalinos y alcalinotérreos como en la zona radical y en tejidos de la planta, causando estrés osmótico e interrumpiendo la homeostasis iónica celular a través de la inhibición de la toma de nutrientes esenciales, además la acumulación de Na hasta niveles potencialmente tóxicos dentro de las células (Marschner, 2002; Rui et al., 2009; Memon et al., 2010).

Los niveles de Fe rondaron entre 1,250 ppm (LC-E) y 2,600 ppm (MM-E), arriba del Rango de Suficiencia de Nutrientes para cultivos de hoja (L & A., 1990), los cuales se indican de 60 a 200 ppm para Fe. A pesar de que el hierro participa en la formación de la clorofila, en la fijación del nitrógeno y en el proceso respiratorio de los vegetales, el exceso no permite la correcta absorción de fósforo, además del riesgo toxicológico que representa para el consumo humano de alimentos contaminados. El Mn en el metabolismo de las plantas es competitivo con el Fe (Sideris, 1950; Teichler-Zallen, 1969). El aumento de la concentración de Fe en *H. verticillata* con un suministro constante de Mn provoca la disminución gradual en los niveles de Mn (Basiouny, F., Garrard, L. & Haller, W., 1977).

Los niveles de Mn rondaron entre 180 ppm (MM-F) y 210 (MO-F), evidenciando que los seis tratamientos rebasaron los niveles normales para este elemento los cuales se encuentran entre 25 a 40 ppm. La disponibilidad de Mn depende del aporte orgánico, de la actividad microbiana y del pH del suelo, incrementándose conforme baja el pH del suelo. El exceso de Mn interfiere con las enzimas, disminuye la respiración y está relacionado con la destrucción de auxinas (Foy et al., 1978; Marschner, 1998). Con respecto a su movilidad, este elemento se distribuye y se disipa uniformemente en las raíces (Wallace et al., 1977). La toxicidad por Mn es poco común en los cultivos ya que el ión  $Mn^{2+}$  se lava fácilmente del suelo, además de que ocurren generalmente en suelos con pH menor a 5.4 (Castellanos, Uvalle-Bueno, & Aguilar-Santelises, 2000).

Por su alta capacidad de bioacumulación, *Hydrilla verticillata* es capaz aportar metales como potasio, sodio, zinc, plomo, hierro, cadmio, magnesio, cobre, calcio, entre otros (Carbonell et al., 1998; Zhu et al., 1999; Ingole and Bhole, 2003; El-Gendy et al., 2006; Tiwari et al., 2007). Con los niveles altos de sodio (Na), hierro (Fe) y manganeso (Mn), se evidencia la prevalencia de metales en los seis prototipos de compost. Esto contrastado con los análisis de plantas acuáticas del lago de Atitlán (mencionada en la sección 2.2.3.), en donde se reportó la presencia de zinc (Zn), plomo (Pb), cadmio (Cd) y arsénico (As), además de encontrar mercurio (Hg) en muestras de sedimentos de aguas superficiales del lago (Mishra, y otros, 2006); da una alerta sobre la presencia de algunos o todos los metales pesados en los compost resultantes, debido a la identificación de los mismos en *H. verticillata* del lago de Atitlán. De ser así, es importante descartar la posibilidad del uso de esta planta como base para la producción de compost e informar a la comunidad para prevenir daños tanto en la salud como en los métodos agrícolas de la región.

#### 4. JUSTIFICACIÓN

El municipio de San Pedro la Laguna ha tenido grandes repercusiones por el crecimiento y la acumulación de *Hydrilla verticillata*, pues, además de su alta proliferación, la corriente de vientos favorece el arrastre de grandes masas de *H. verticillata* muerta, provocando cambios en los niveles de oxígeno disuelto y químicos en los ecosistemas acuáticos de las áreas contaminadas, lo cual delimita la existencia de otras especies macrófitas y animales. Además, estropea el transporte acuático, actividades de pesca, uso recreativo.

Por esta razón existen zonas en donde es de gran importancia la remoción de *H. verticillata*, especialmente en áreas de servidumbre cercanas a muelles o de alto tráfico de lanchas y de turismo (Pesacreta, 1988 & Madsen, 1997).

Una de las comunidades más afectadas está en el cantón Tza'n Kaqajaay, quienes se organizan para realizar campañas de extracción de *H. verticillata*, enfocada en la remoción de los restos de la planta muerta, que es llevada a la orilla de la playa. El material extraído en estas zonas no recibe algún tratamiento, ni se aprovecha, por lo que se acumula y descompone en las playas, generando lodos, mal olor y plagas. Focos de contaminación microbiológica y visual.

Solo una pequeña proporción de *H. verticillata* es llevada a planta de tratamiento de desechos sólidos de la Municipalidad de San Pedro, en donde se utiliza como componente principal en el proceso de compostaje. A partir de esto, el equipo EPSUM-AMSCLAE estudió seis distintos métodos de compostaje a base de *H. verticillata*, al que se le realizaron análisis de propiedades físico-químicas, microbiológicas y su efectividad económica, en el que se demostró el alto contenido de metales considerados micronutrientes como, sodio (Na), hierro (Fe) y manganeso (Mn), pues al ser *H. verticillata*, una planta hiperacumuladora, se le atribuye el aporte de estos metales. Se debe tomar en cuenta que esta propiedad, hiperacumuladora, no solo le permite retener metales considerados micronutrientes, si no también metales pesados.

Diversos estudios, han demostrado la contaminación de metales pesados en el Lago de Atitlán, encontrándose con mayor concentración, el arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb). Esta contaminación se le atribuye, tanto por la naturaleza de los suelos de esta área, como a las actividades antropológicas que se dan en la cuenca y en el Lago (Oliva, B.; Pérez, J.F., del Cid; M., Martínez, F. J., y Valladares, B. 2009).

La presencia de estos metales en el abono orgánico puede representar riesgos en el uso local, como para la comercialización del mismo, principalmente por su acumulación en los suelos o sustratos, alterando el equilibrio biológico del área de aplicación de compost y presentando disminución en el rendimiento de los cultivos, afectando la salud animal y humana. Por lo que en este trabajo de investigación se determinó la concentración de arsénico, cadmio, mercurio y plomo (As, Cd, Hg y Pb) presente en el abono orgánico hecho a base de *Hydrilla verticillata*, en el que se evaluó la aptitud de los seis prototipos para su uso agrícola, de tal forma que las autoridades del Cantón T´zan Kaqajaay, San Pedro la Laguana, Sololá, tengan las herramientas para tomar decisiones sobre la problemática.

## 5. OBJETIVOS

### GENERAL

Determinar los niveles de concentración de arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) en seis diferentes prototipos de compost hechos a base de *Hydrilla verticillata* para el uso en actividades agrícola, instaladas en el cantón Tza'n Kaqajaay, San Pedro la Laguna, Sololá, Guatemala.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Cuantificar los niveles de concentración de As, Cd, Hg y Pb disponibles en los seis prototipos de compost (vermicompost, microorganismos de montaña y material orgánico; picado y no picado) que poseen *Hydrilla verticillata* como componente principal.
- Comparar las concentraciones de As, Cd, Hg y Pb presentes en los seis prototipos de compost con los valores permisibles de acuerdo con la norma NTC 5167 (ICONTEC, 2011) y las CCPAE, versión 17-10-2003 (CCPAE, 2003) para determinar si el abono orgánico cumple con los requerimientos para el uso agrícola.

## 6. HIPÓTESIS

Los seis prototipos de compost (vermicompost, microorganismos de montaña y material orgánico; picado y no picado) hechos con *Hydrilla verticillata* como materia prima, en el cantón Tza'n Kaqajaay, San Pedro la Laguna, Sololá contiene arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb).

## **7. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **7.1. UNIVERSO:**

Seis prototipos de compost con *Hydrilla verticillata* como principal componente, trabajadas en el cantón Tza'n Kaqajaay de San Pedro la Laguna, Sololá, Guatemala.

### **7.2. MUESTRA:**

6 muestras de 100 g de compost con *Hydrilla verticillata* como componente principal (vermicompost, microorganismos de montaña y material orgánico; picado y no picado) elaborados en el canton T'zan Kaqajaay, San Pedro la Laguna Sololá, bajo tres distintos tratamientos: Descomposición con materia orgánica de desechos de cocina y mercados, microorganismos de montañas y lombricompost. Cada uno de estos se hizo por duplicado (se diferenciaron por la forma de agregar la *H. verticillata*, uno de los tratamientos con la planta entera y la otra fraccionada).

### **7.3. CRISTALERÍA**

- Vasos de precipitados de 10, 50, 100 y 250 mL
- Balones aforados de 10, 25 y 50 mL
- Vidrio de reloj
- Probetas de 10, 25, 50 mL
- Tubos de ensayo de 10 mL

### **7.4. MATERIALES**

- Espátula
- Pipetas
- Pipeteador
- Papel parafilm
- Gradilla para tubos de ensayo de 10 mL
- Termómetro graduado de -5 a 360°C
- Contenedor de muestra (bolsa Ziploc) de 2.26 Kg

## 7.5. Equipo

- Sistema de digestión de microondas: Speedwave®.
- Espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer.
- Voltamperómetro METROHM No. 231/2.
- Tamiz
- Vortex
- Balanza analítica
- Computadora

## 7.6. Reactivos

<b>Reactivo</b>	<b>Cantidad (g o ml)</b>	<b>Calidad</b>
1. Ácido nítrico concentrado	250 mL	Ultrapuro
2. Ácido clorhídrico	250 mL	Ultrapuro
3. Ácido sulfúrico	250 mL	Ultrapuro
4. Estándar de Arsénico	50 mL	1 000 mg/L ultrapuro
5. Estándar de Cadmio	50 mL	1 000 mg/L ultrapuro
6. Estándar de Mercurio	50 mL	1 000 mg/L ultrapuro
7. Estándar de Plomo	50 mL	1 000 mg/L ultrapuro
8. Agua desmineralizada	5 L	Ultrapura
9. Hidróxido de sodio	15 g	Suprapuro
10. Hidróxido de sodio	15 g	30%
11. Ioduro de potasio	5 g	Grado reactivo
12. Borhidruro de sodio	5 g	Grado reactivo
13. Solución espumante Perkin Elmer	5 mL	Ultrapuro
14. Permanganato de potasio	10 g	Grado reactivo
15. Cloruro de estaño	5 g	Grado reactivo
16.1 - Octanol	10 mL	Grado reactivo

## **7.7. METODOLOGÍA**

### **7.7.1. ETAPA 1: RECOLECCIÓN DE MUESTRAS:**

- 7.7.1.1. Mezclar el compost hasta homogenizar.
- 7.7.1.2. Tomar tres alícuotas de 100 g en peso neto de cada compost elaborado a base de *H. verticillata* y a cada una colocarla dentro de una bolsa plástica de 2 kg.
- 7.7.1.3. Homogenizar cada muestra en la bolsa sellada, durante 5 minutos.

### **7.7.2. ETAPA 2: SECADO DE MUESTRAS**

- 7.7.2.1. Esparcir cada muestra sobre una lámina de plástico
- 7.7.2.2. Secar al aire, mezclando periódicamente, hasta que la humedad alcance alrededor de 40 % a 50 %.
- 7.7.2.3. Verificar cada 6-12 h para evitar el sobresecado.

### **7.7.3. ETAPA 3: TAMIZAJE DE LA MUESTRA**

- 7.7.3.1. Transferir alrededor de 25 g de muestra a un tamiz de 16 mm, tapar y agitar por 1 minuto.
- 7.7.3.2. Repetir el procedimiento hasta tamizar toda la muestra.

(Sadzawka, Carrasco, Grez, & Mora, 2005)

### **7.7.4. ETAPA 4: DIGESTIÓN DE LA MUESTRA**

- 7.7.4.1. Pesar 0.25 g de muestra seca y tamizada dentro del vaso de digestión DAP60.
- 7.7.4.2. Adicionar 10 mL de HNO<sub>3</sub> y agitar la mezcla cuidadosamente utilizando agitador magnético de PTFE ó con varilla de vidrio.
- 7.7.4.3. Esperar al menos 10 minutos antes de cerrar completamente el vaso.
- 7.7.4.4. Cargar los 12 vasos en la cámara del microondas
- 7.7.4.5. Iniciar el calentamiento mediante el siguiente programa:

Tabla 14. Programa de Temperaturas

Paso	Temperatura (°C)	Presión (BAR)	T	Rampa (min)	Potencia (%)
1	140	30	5	5	70
2	160	30	3	5	80
3	175	35	3	20	80
4	50	25	1	10	0
5	-	-	-	-	-

Fuente: (Gallego, 2011)

**7.7.4.6.** Para evitar salpicaduras y espumación en la apertura de los vasos, esperar a que lleguen a temperatura ambiente (aprox. 20 min).

**7.7.4.7.** Abrir los vasos cuidadosamente en una campana extractora.

**7.7.4.8.** De ser necesario, filtrar la muestra

**7.7.4.9.** Transferir a un matraz aforado de 25 mL utilizando pipeta.

**7.7.4.10.** Realizar al menos tres lavados al vaso DAP60 con agua ultrapura y transferir al mismo matraz de 25 mL.

**7.7.4.11.** Enrasar el matraz para su análisis.

## **7.7.5. ETAPA 5: CUANTIFICACIÓN DE METALES EN COMPOST**

### **7.7.5.1. CUANTIFICACIÓN DE ARSÉNICO (As)**

#### **7.7.5.1.1. Preparación de disolución Stock de arsénico (1 mg/L)**

- a. En un balón aforado de capacidad 10 mL, agregar 0.1 mL de estándar de arsénico de 1000 mg/L trazable al SRM de NIST  $H_3AsO_4$  en  $HNO_3$  0.5 mol/L y aforar con ácido clorhídrico al 0.5%.
- b. Agregar 250 $\mu$ L de la solución del numeral "a" y aforar con ácido clorhídrico al 0.5% en un balón de 25 mL.

#### 7.7.5.1.2. Estándares de trabajo

- a. En tubos de reacción de arsénico, preparar cinco estándares de trabajo de concentraciones 1.5, 3.0, 6.0, 9.0 y 12 µg/L.
- b. A cada uno agregar los siguientes volúmenes:

*Tabla 15. Preparación de Curva de Calibración de arsénico en absorción atómica.*

Concentración de estándares (µg/L)	HCl 32% (mL)	H <sub>2</sub> O (mL)	Volumen de solución stock (µL)	A. ascórbico 1% (gotas)	KI 1% (gotas)
Banco	12	20	---	2	2
1.5	12	19.7	300	2	2
3.0	12	19.4	600	2	2
6.0	12	18.8	1200	2	2
9.0	12	18.2	1800	2	2
12.0	12	12	2400	2	2
Muestra (5mL)	12	5			

Fuente: (Valiente, 2008)

#### 7.7.5.1.3. Lectura de muestras en absorción atómica por generador de hidruros

- a. Preparar 500 mL de una disolución de ácido clorhídrico al 3 % v/v.
- b. Preparar el agente reductor (generador de hidruros): En una probeta de 500mL disolver 2.5 g de borohidruro sódico, agregar 6.25 mL de hidróxido de sodio y 250 µL de solución antiespumante Perkin Elmer (Silicon Defoaming Agent) para análisis por MHS-FIAS. Enrasar hasta 500 mL con agua ultrapura (0.75% m/v NaBH<sub>4</sub> + 0.01% m/v NaOH). Trasvasar a frasco tipo PET.
- c. Montar el equipo de generación de hidruros y la celda térmica en el espectrofotómetro de absorción atómica MHS-FIAS.
- d. Encender la celda térmica del equipo y esperar hasta alcanzar una temperatura de 900 °C
- e. Cargar el método para análisis de arsénico en el programa

- f. Encender la lámpara de descarga de electrodos de arsénico.
- g. Esperar 1 hora para permitir el calentamiento de la lámpara.
- h. Introducir el número de muestras a leer con nombre y factor de dilución.
- i. Leer curva de calibración y muestras (las cuales se colocarán en un automuestreador).

#### **7.7.5.1.4. Medidas instrumentales**

- a. Longitud de onda rendija 193.7 nm 0.7 nm
- b. Caudal aire 1.025 – 1.15 L/min
- c. Gas portador Argón (250 mL/min)
- d. Reductor empleado  $\text{NaBH}_4$  al 0.5% y NaOH al 1%
- e. Agente acidificante o 61 carrier HCl al 3 % v/v 16 7.5

#### **7.7.5.2. CUANTIFICACIÓN DE MERCURIO (Hg):**

##### **7.7.5.2.1. Preparación de disoluciones reactivas**

- a. Disolución estándar intermedia de mercurio 100 mg/L (1 ng/ $\mu\text{L}$ ): Medir 1 mL de la disolución stock comercial de mercurio y transferir a un balón volumétrico de 10 mL. Aforar con la mezcla de ácidos
- b. Disolución estándar de trabajo de mercurio 1 mg/L (1  $\mu\text{g}/\text{mL}$  ó 1 ng/ $\mu\text{L}$ ): De la disolución anterior, tomar 0.1 mL y transferir a un balón volumétrico de 10 mL. Llevar a volumen con mezcla de ácidos.
- c. Permanganato de potasio al 5 %: Pesar 5 g de permanganato de potasio, transferir a un balón volumétrico de 100 mL y aforar a 100 mL con agua.
- d. Ácido sulfúrico y ácido nítrico al 1.5 % v/v: Medir 1.5 mL de ácido nítrico y 1.5 mL de ácido sulfúrico y transferir a un balón volumétrico de 100 mL. Llevar a volumen con agua destilada.
- e. Cloruro de estaño al 5 % p/v en ácido clorhídrico al 10 % v/v: Preparar con la cantidad de HCl en total, se pesa la cantidad de Cloruro de Estaño, se agrega el ácido y se calienta hasta que se disuelva y esté transparente, dejar enfriar y llevar a volumen.

### 7.7.5.2.2. Preparación de curva de calibración

- a. Agregar estándares de la curva a concentraciones 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 µg/L.

Tabla 16. Preparación de Curva de Calibración de mercurio en absorción atómica.

Concentración de estándares (µg/L)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> y HNO <sub>3</sub> (mL) 1.5%	H <sub>2</sub> O (mL)	Volumen de solución estándar (1 µg/mL en mezcla de ácidos)	1-Octanol (gotas)	KMnO <sub>4</sub> 5% (gotas)
Banco	5	5	---	1	3-6
1	5	5	10	1	3-6
2	5	5	20	1	3-6
4	5	5	40	1	3-6
6	5	5	60	1	3-6
8	5	5	80	1	3-6
10	5	5	100	1	3-6
12	5	5	120	1	3-6
Muestra (5 mL)	5	5	---	1	3-6

Fuente: (Soto, 2017)

- b. El octanol y el permanganato de potasio, se agregan a cada copa, segundos antes de ensamblarla al dispositivo generador de hidruros-vapor frío. 1-Octanol 1 gota Permanganato de potasio al 5 % p/v 3-6 gotas

### 7.7.5.2.3. Preparación de la muestra:

- a. A las muestras digeridas se les debe de agregar 0.05 g de peroxodisulfato como preservante del metal. Almacenar en refrigeradora (si no se realiza pronto el análisis, congelar).

### 7.7.5.2.4. Lectura de las muestras

- a. Montar el equipo de generación de vapor frío y ajustar los parámetros requeridos.
- b. Leer la curva de calibración, colocando cada punto en el automuestreador.
- c. Leer el control de calidad para asegurar la lectura correcta de las muestras.
- d. Ingresar y leer las muestras en el sistema.
- e. Lavar el nebulizador entre cada lectura de las muestras

#### 7.7.5.2.5. Parámetros

- a. Técnica: Absorción atómica AA
- b. Longitud de Onda: 253.7 nm
- c. Tiempo de Integración: 20 segundos
- d. Proceso de datos: 19 puntos
- e. Temperatura de la celda: 1000C.

#### 7.7.5.3. CUANTIFICACIÓN DE CADMIO (Cd)

##### 7.7.5.3.1. Preparación de reactivos.

- a. Control de calidad: En un balón aforado de 100 mL adicionar 10 mL de agua desmineralizada, 5 mL de ácido nítrico grado ultrapuro y 10 µL de la solución multiestándar de 100 mg/mL de Cd
- b. Aforar el balón con agua desmineralizada para obtener una concentración de 0.010 mg/L Cd.

##### 7.7.5.3.2. Preparación de la curva de calibración.

- a. Solución madre (5 mg/L): en un balón aforado de 25 mL adicionar 5 mL de agua desmineralizada y 125 µL de las soluciones estándar de 1 000 mg/L de Cd. Aforar con agua desmineralizada.
- b. Preparar la curva de calibración a partir de la solución madre, de la siguiente forma:

*Tabla 17. Preparación de Curva de Calibración de cadmio en absorción atómica.*

Alícuota (µL)	HNO <sub>3</sub> ultrapuro (mL)	Aforo (mL)	Concentración final (mg/L)
0	1.25	25	0.000
5	1.25	25	0.001
25	1.25	25	0.005
50	1.25	25	0.010
100	1.25	25	0.020

Fuente: (Morales, 2018)

#### **7.7.5.3.3. Lectura de las muestras.**

- a. Montar el equipo de generación de horno de grafito
- b. Ya ajustadas las condiciones del equipo, leer la curva de calibración, colocando punto en la posición del automuestreador.
- c. Leer el control de calidad para asegurar la lectura correcta de las muestras.
- d. Ingresar las muestras al sistema y analizar.
- e. Lavar el nebulizador entre cada lectura de muestra.

#### **7.7.5.3.4. Medidas instrumentales**

- a. Plasma 15 L/min
- b. Flujo auxiliar 0.2 L/min
- c. Flujo nebulizador 0.5 L/min
- d. Posición cassette -4.5
- e. Potencia 1 300 watts
- f. Tiempo de lavado 45 min

### **7.7.5.4. CUANTIFICACIÓN DE PLOMO (Pb)**

#### **7.7.5.4.1. Preparación de reactivos.**

- c. Control de calidad: En un balón aforado de 100 mL adicionar 10 mL de agua desmineralizada, 5 mL de ácido nítrico grado ultrapuro y 10  $\mu$ L de la solución multiestándar de 100 mg/mL de Cd
- d. Aforar el balón con agua desmineralizada para obtener una concentración de 0.010 mg/L Cd.

#### **7.7.5.4.2. Preparación de la curva de calibración.**

- a. Solución madre (5 mg/L): en un balón aforado de 25 mL adicionar 5 mL de agua desmineralizada y 125  $\mu$ L de las soluciones estándar de 1 000 mg/L de Pb Aforar con agua desmineralizada.
- b. Preparar la curva de calibración a partir de la solución madre, de la siguiente forma:

Tabla 18. Preparación de Curva de Calibración de plomo en absorción atómica.

Alícuota (µL)	HNO <sub>3</sub> ultrapuro (mL)	Aforo (mL)	Concentración final (mg/L)
0	1.25	25	0.000
5	1.25	25	0.001
25	1.25	25	0.005
50	1.25	25	0.010
100	1.25	25	0.020

Fuente: (Morales, 2018)

#### 7.7.5.4.3. Lectura de las muestras.

- a. Montar el equipo de generación de horno de grafito
- b. Ya ajustadas las condiciones del equipo, leer la curva de calibración, colocando punto en la posición del automuestreador.
- c. Leer el control de calidad para asegurar la lectura correcta de las muestras.
- d. Ingresar las muestras al sistema y analizar.
- e. Lavar el nebulizador entre cada lectura de muestra.

#### 7.7.5.4.4. Medidas instrumentales

- g. Plasma 15 L/min
- h. Flujo auxiliar 0.2 L/min
- i. Flujo nebulizador 0.5 L/min
- j. Posición cassette -4.5
- k. Potencia 1 300 watts
- l. Tiempo de lavado 45 min

#### **7.7.6. ETAPA 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS:**

Determinar el contenido de los cuatro metales de interés (As, Cd, Hg y Pb) de forma exploratoria y descriptiva, mediante un análisis estadístico univariado para cada metal en los seis prototipos de compost (vermicompost, microorganismos de montaña y material orgánico; picado y no picado), hechos a base de *Hydrilla verticillata* como materia prima, en el cantón Tza'n Kaqajaay, San Pedro la Laguna, Sololá; utilizando el método de mínimos cuadrados.

El promedio de la concentración de cada metal en cada prototipo de compost indica si los niveles de los metales de interés, se encuentran dentro de los parámetros permisibles en compost, requeridos por la norma NTC 5167 y las CCPAE, versión 17-10-2003.

#### **7.7.7. ETAPA 7: COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS CON LA NORMA NTC 5167** (Norma técnica colombiana) (ICONTEC, 2011):

Determinar si el compost cumple con los requerimientos específicos para metales en el uso agrícola.

#### **7.7.8. ETAPA 8. COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS CON LAS NORMAS –CCPAE-, VERSIÓN 17-10-2003** (CCPAE, 2003):

Determinar si el compost cumple con los requerimientos específicos para metales en el uso agrícola.

#### **7.7.9. ETAPA 9. COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS CON EL ACUERDO GUBERNATIVO 236-2006 DE GUATEMALA.**

(Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2006) : Determinar si el compost cumple con los requerimientos específicos para metales en el uso agrícola

#### **7.7.10. PRESENTACIÓN DE DATOS EN ESCALA LOGARÍTMICA:** Si los resultados y de los parámetros presentan valores muy distantes entre sí en escala natural, utilizar escala logarítmica, que es una escala de medida que utiliza logaritmos de una cantidad física en lugar de una cantidad propia. El logaritmo cubre una amplia gama de datos y reduce el rango de

valores, lo cual facilita la interpretación gráfica de los resultados. El logaritmo de valores menores a uno, dan como resultado, números negativos, por lo que es importante que si los resultados presentan valores menores a 1, multiplicar todos los datos por factor 1000 previo de la conversión a la escala logarítmica.

## 8. RECURSOS ECONÓMICOS E INSTITUCIONALES

### 8.1. Recursos Humanos

- Investigadora: Br. Amparo Alejandra Díaz Hernández  
Estudiante de Licenciatura en Química
- Asesora: Licda. Rosa Patricia Navas Najera

### 8.2. Recursos Institucionales

- Centro de Información y Asesoría Toxicológica de Guatemala -CIAT-.
- Biblioteca Central Universitaria, USAC
- Centro de Documentación Bibliotecaria de Farmacia –CEDOBF-
- Centro de Documentación e Información Agrícola –CDIA-
- Dirección General de Investigación –DIGI-
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación de Guatemala, Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgos –DIGEGR-

### 8.3. Recursos Económicos

Actividad	Precio (Q)	Muestras	Recursos Económico	Total. (Q)
<b>Recolección de muestra</b>	150.00	6	Estudiante	150.00
<b>Análisis* de Arsénico</b>	300.00	6	Estudiante	1800.00
<b>Análisis* de Cadmio</b>	200.00	6	Estudiante	1200.00
<b>Análisis* de Mercurio</b>	300.00	6	Estudiante	1800.00
<b>Análisis* de Plomo</b>	350.00	6	Estudiante	2100.00
<b>Total</b>				7050.00

\*Cada análisis incluye: Digestión, tres repeticiones, curva de calibración y materiales y equipo

## 9. RESULTADOS

Tabla 19. Datos de las seis muestras de compost a base de *H. verticillata* del cantón Tza'n Kaqajaay, San Pedro la Laguna, Sololá.

	Fecha de muestreo	Hora de muestreo	Fecha de informe	Código de la muestra	T° de almacenaje
<b>MO-E</b>	07/06/2020	11:00	23/06/2020	20-1889-4	5°C
<b>MO-F</b>	07/06/2020	11:30	23/06/2020	20-1889-3	5°C
<b>LC-E</b>	07/06/2020	12:00	23/06/2020	20-1889-2	5°C
<b>LC-F</b>	07/06/2020	12:30	23/06/2020	20-1889-1	5°C
<b>MM-E</b>	07/06/2020	13:00	23/06/2020	20-1889-6	5°C
<b>MM-F</b>	07/06/2020	13:30	23/06/2020	20-1889-5	5°C

Fuente: Análisis en Laboratorio ECOQUIMSA. informe emitido el 23 de junio de 2020 con código de muestras de la 20-1889-1 a la 20-1889-6.

Tabla 20. Límites de detección de arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) analizados por espectrómetro de absorción atómica.

	As (mg/Kg)	Cd (mg/Kg)	Hg (mg/Kg)	Pb (mg/Kg)
<b>Límite de detección</b>	0.0009	0.009	0.0006	0.076

As: Arsénico. Cd: Cadmio. Hg: Mercurio. Pb: Plomo.

Fuente: Análisis en Laboratorio ECOQUIMSA. informe emitido el 23 de junio de 2020 con código de muestras de la 20-1889-1 a la 20-1889-6.

Tabla 21. Disponibilidad de arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) en seis prototipos de compost a base de *H. verticillata*.

	As (mg/Kg)	Cd (mg/Kg)	Hg (mg/Kg)	Pb (mg/Kg)
<b>MO-E</b>	0.918	0.892	0.047	8.860
<b>MO-F</b>	0.723	0.590	0.011	7.400
<b>LC-E</b>	0.749	0.992	0.060	20.540
<b>LC-F</b>	0.955	0.956	0.045	9.360
<b>MM-E</b>	0.816	1.090	<0.006	6.700
<b>MM-F</b>	0.797	0.656	0.0006	6.540
<b>Promedio</b>	0.826	0.863	0.027	9.900
<b>Varianza</b>	± 0.007	± 0.032	± 0.001	± 2.057

Debajo de los límites permisibles

Entre los límites permisibles

Encima de los límites permisibles

As: Arsénico. Cd: Cadmio. Hg: Mercurio. Pb: Plomo.

Fuente: Análisis en Laboratorio ECOQUIMSA. informe emitido el 23 de junio de 2020 con código de muestras de la 20-1889-1 a la 20-1889-6.

Tabla 22. Recopilación de normas y acuerdo sobre la disponibilidad aceptable de arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) en un compost.

	As (mg/Kg)	Cd (mg/Kg)	Hg (mg/Kg)	Pb (mg/Kg)
<b>NORMA NTC 5167</b>	41	39	17	300
<b>NORMA CCPAE 17-10-2003</b>	2	-	1	100
<b>ACUERDO 236-2006</b>	50	50	25	500

As: Arsénico. Cd: Cadmio. Hg: Mercurio. Pb: Plomo.

Fuente: : (ICONTEC, 2011) (CCPAE, 2003) (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2006)

Tabla 23. Disponibilidad de arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) en seis prototipos de compost a base de *H. verticillata* multiplicados por 1000 en escala logarítmica.

	As (mg/Kg)	Cd (mg/Kg)	Hg (mg/Kg)	Pb (mg/Kg)
<b>MO-E</b>	2.963	2.950	1.672	3.947
<b>MO-F</b>	2.859	2.771	1.041	3.869
<b>LC-E</b>	2.874	2.997	2.778	4.312
<b>LC-F</b>	2.980	2.980	1.653	3.97
<b>MM-E</b>	2.912	3.037	<0.0006	3.826
<b>MM-F</b>	2.901	2.817	0.778	3.815

Debajo de los límites de detección

As: Arsénico. Cd: Cadmio. Hg: Mercurio. Pb: Plomo.

Entre los límites permisibles

Fuente: Análisis en Laboratorio ECOQUIMSA. informe emitido el 23 de junio de 2020 con código de muestras de la 20-1889-1 a la 20-1889-6.

Encima de los límites permisibles

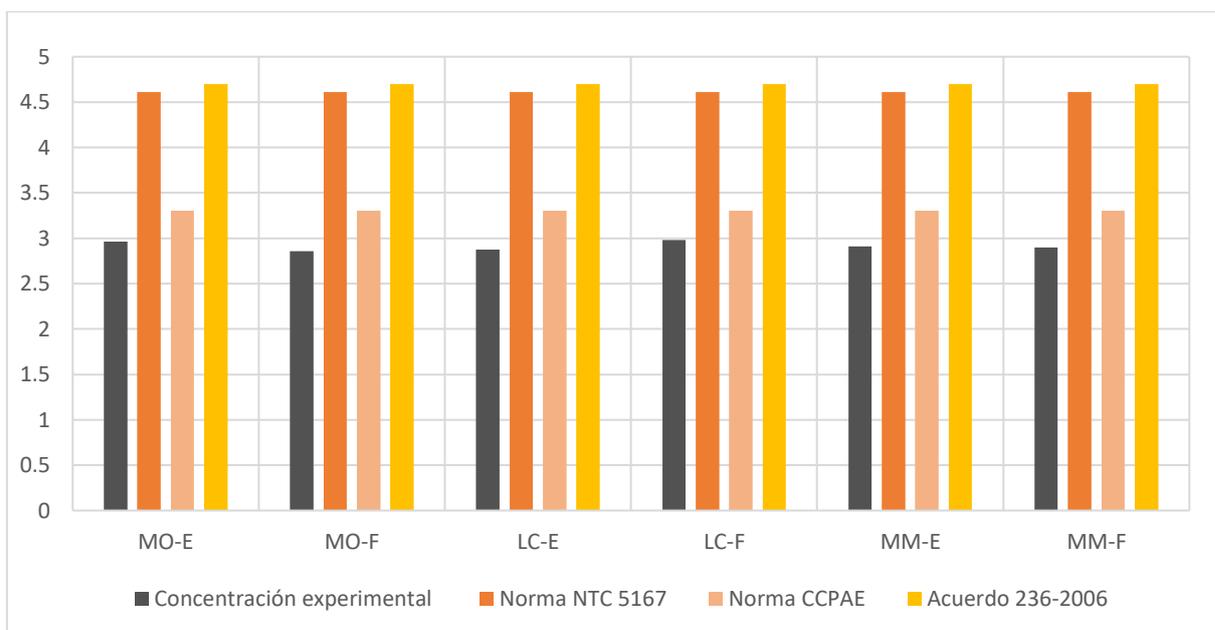
Tabla 24. Recopilación de normas y acuerdo sobre la disponibilidad aceptable de arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) presentes en un compost, multiplicado por 1000 en escala logarítmica.

	As (mg/Kg)	Cd (mg/Kg)	Hg (mg/Kg)	Pb (mg/Kg)
<b>NORMA NTC 5167</b>	4.6123	4.591	5.230	5.477
<b>NORMA CCPAE 17-10-2003</b>	3.301	-	4.000	5.000
<b>ACUERDO 236-2006</b>	4.699	4.699	5.398	5.699

As: Arsénico. Cd: Cadmio. Hg: Mercurio. Pb: Plomo.

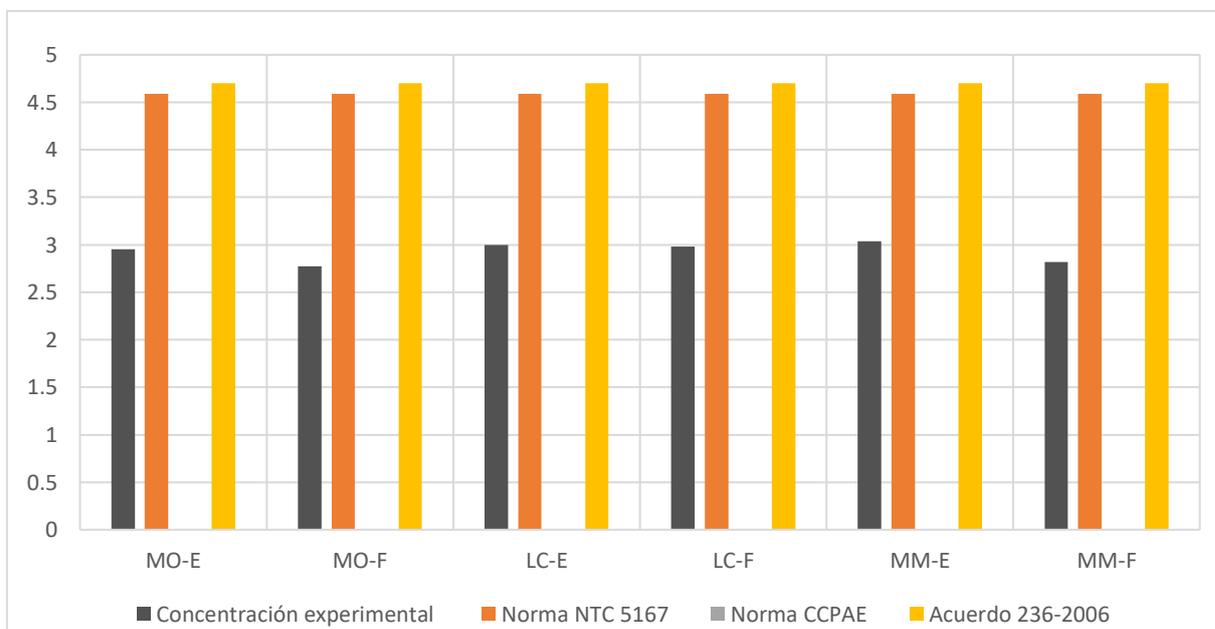
Fuente: : (ICONTEC, 2011) (CCPAE, 2003) (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2006)

*Figura 12. Contenido de As (mg/Kg) multiplicado por 1000 en escala logarítmica en los seis prototipos de compost y comparación con las normas y acuerdo considerados.*



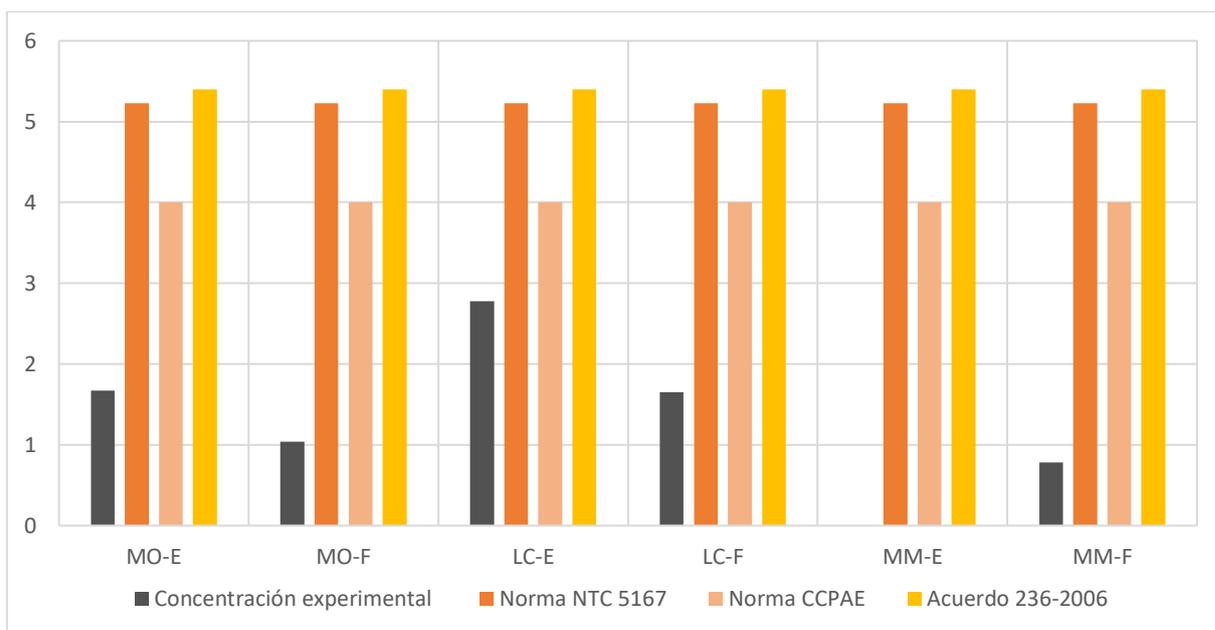
Fuente: Análisis en Laboratorio ECOQUIMSA. Informe emitido el 23 de junio de 2020 con código de muestras de la 20-1889-1 a la 20-1889-6.

*Figura 13. Contenido de Cd (mg/Kg) multiplicado por 1000 en escala logarítmica en los seis prototipos de compost y comparación con las normas y acuerdo considerados.*



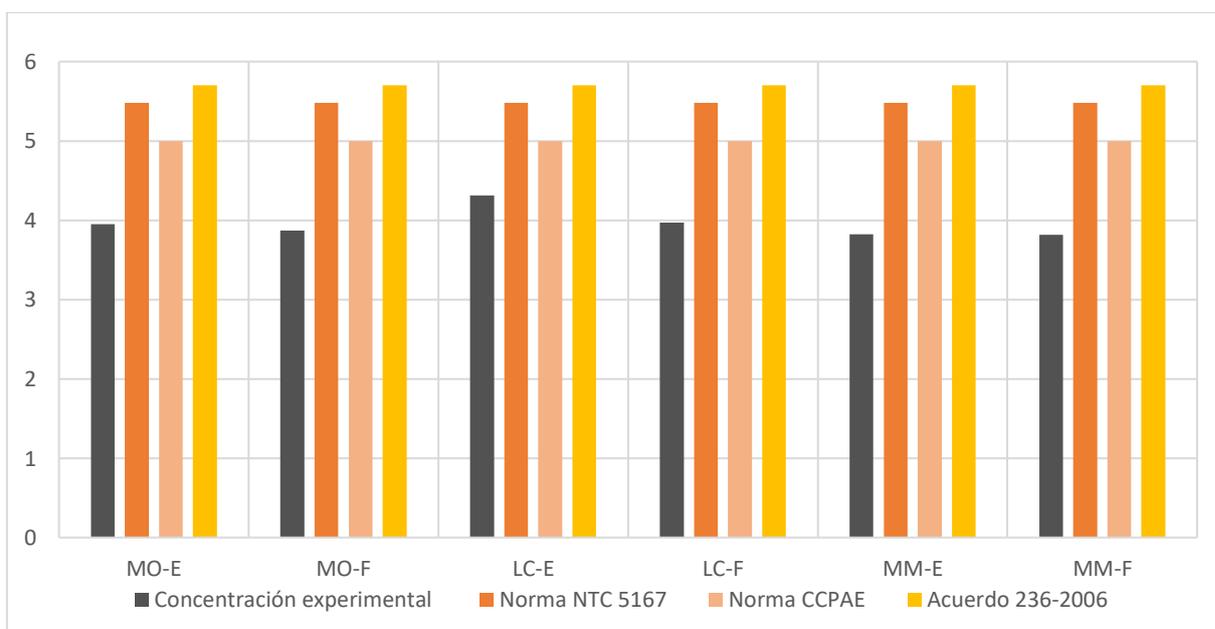
Fuente: Análisis en Laboratorio ECOQUIMSA. informe emitido el 23 de junio de 2020 con código de muestras de la 20-1889-1 a la 20-1889-6.

*Figura 14. Contenido de Hg (mg/Kg) multiplicado por 1000 en escala logarítmica en los seis prototipos de compost y comparación con las normas y acuerdo considerados.*



Fuente: Análisis en Laboratorio ECOQUIMSA. informe emitido el 23 de junio de 2020 con código de muestras de la 20-1889-1 a la 20-1889-6.

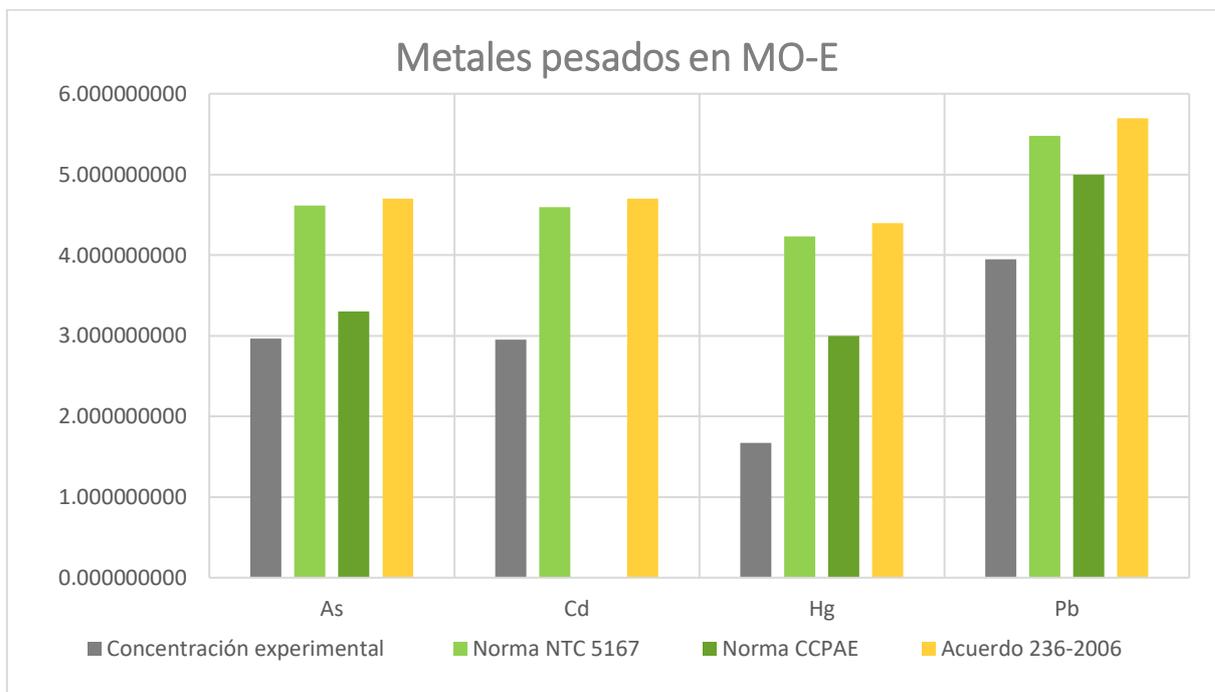
*Figura 15. Contenido de Pb (mg/Kg) multiplicado por 1000 en escala logarítmica en los seis prototipos de compost y comparación con las normas y acuerdo considerados.*



Fuente: Análisis en Laboratorio ECOQUIMSA. informe emitido el 23 de junio de 2020 con código de muestras de la 20-1889-1 a la 20-1889-6.

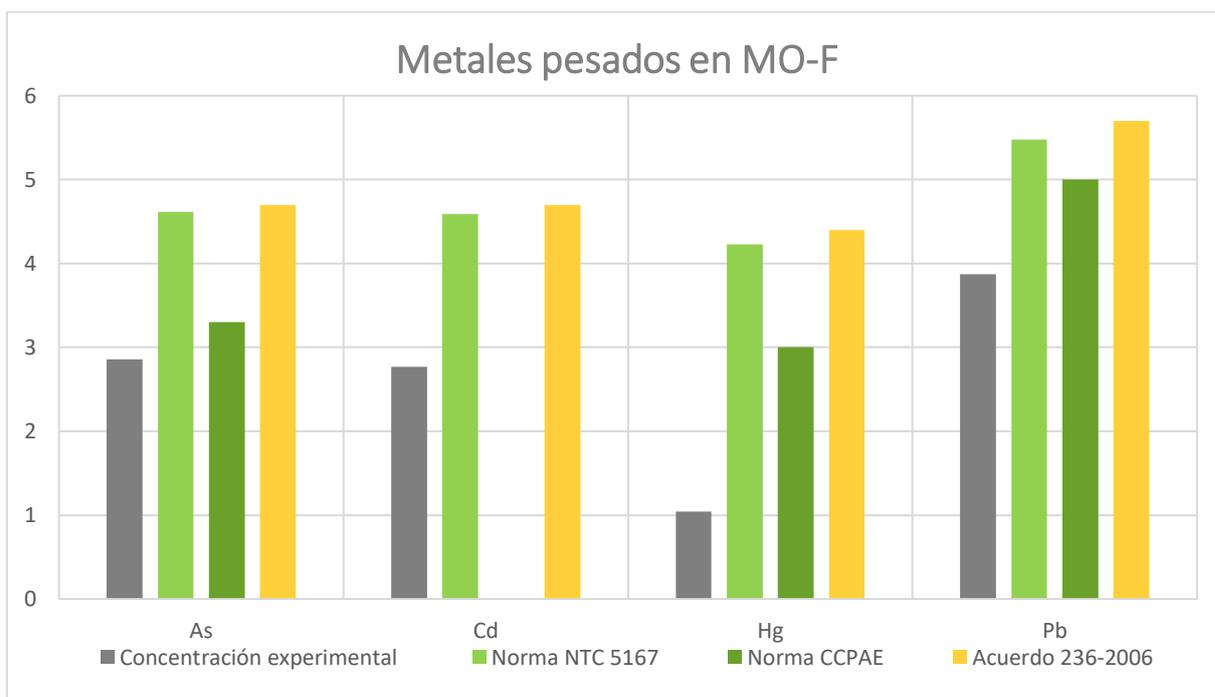
## 9.1. DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO METÁLICO

Figura 16. Descripción de contenido de metales pesados en compost MO-E.



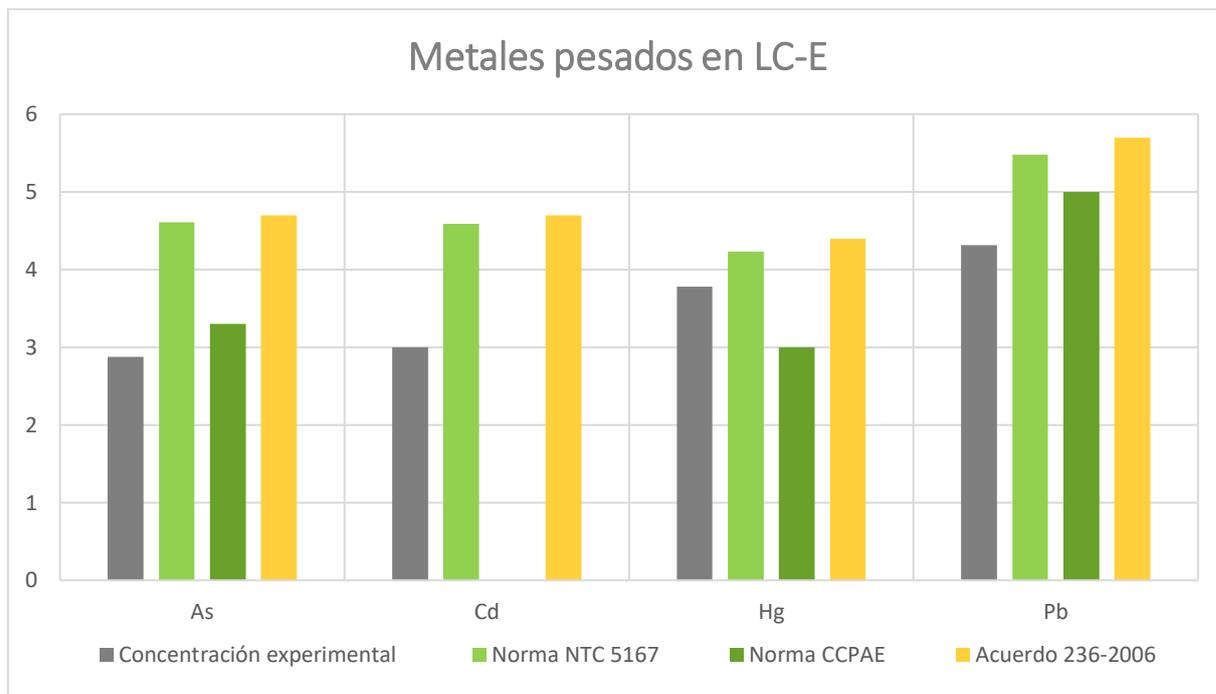
Fuente: Análisis en Laboratorio ECOQUIMSA. informe emitido el 23 de junio de 2020 con código de muestras de la 20-1889-1 a la 20-1889-6.

Figura 17. Descripción de contenido de metales pesados en compost MO-F.



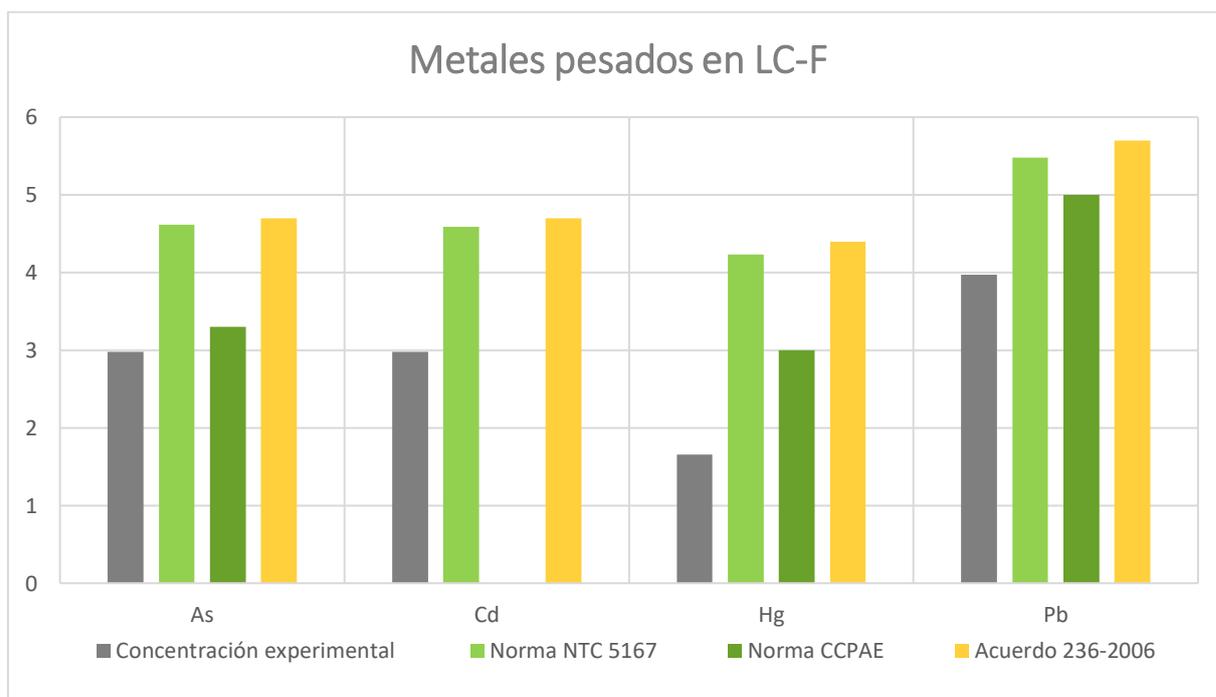
Fuente: Análisis en Laboratorio ECOQUIMSA. informe emitido el 23 de junio de 2020 con código de muestras de la 20-1889-1 a la 20-1889-6.

Figura 18. Descripción de contenido de metales pesados en compost LC-E.



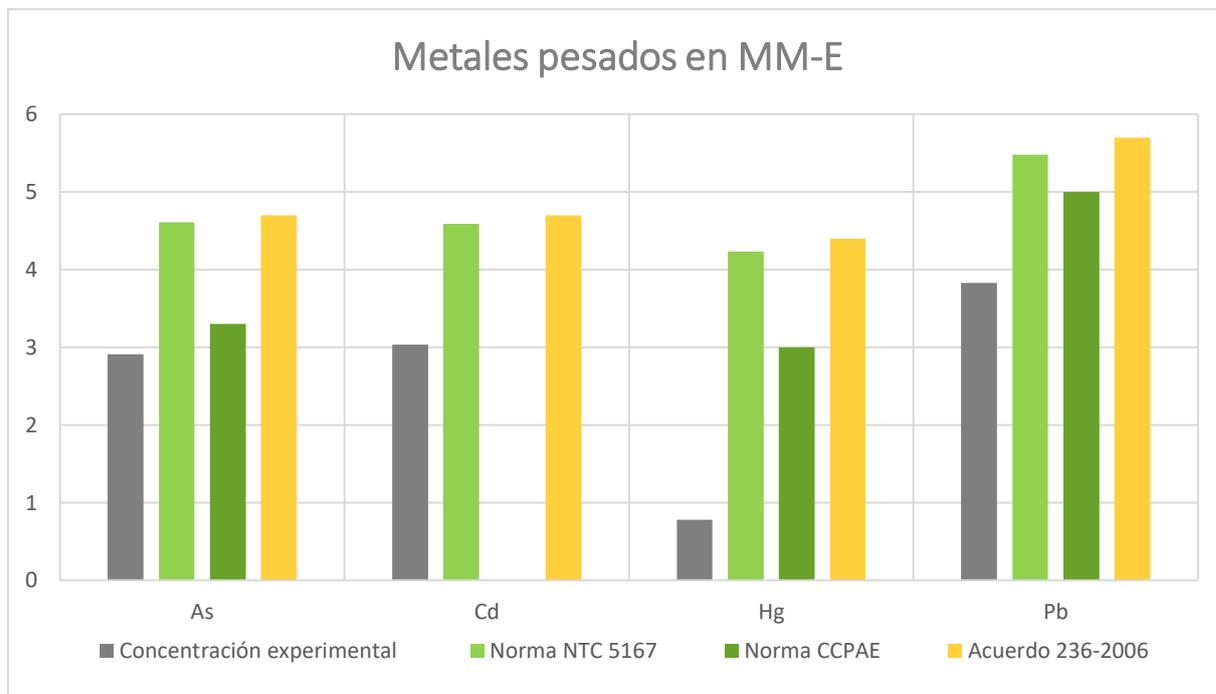
Fuente: Análisis en Laboratorio ECOQUIMSA. informe emitido el 23 de junio de 2020 con código de muestras de la 20-1889-1 a la 20-1889-6.

Figura 19. Descripción de contenido de metales pesados en compost LC-F.



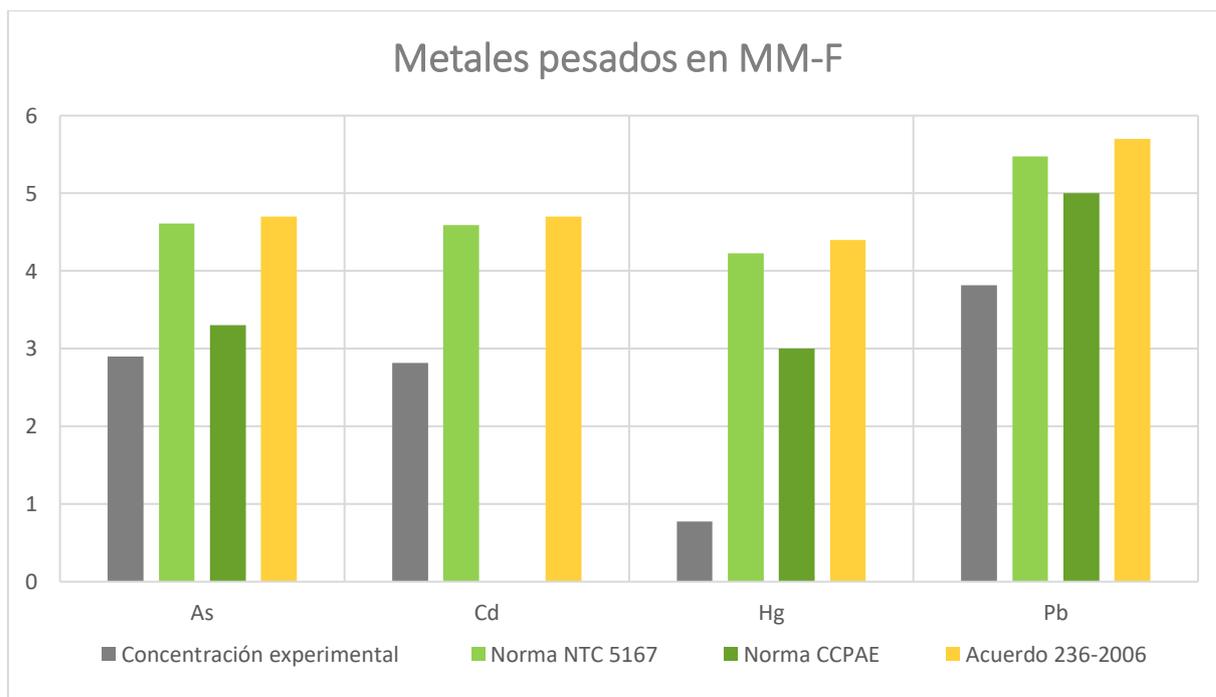
Fuente: Análisis en Laboratorio ECOQUIMSA. informe emitido el 23 de junio de 2020 con código de muestras de la 20-1889-1 a la 20-1889-6.

Figura 20. Descripción de contenido de metales pesados en compost MM-E.



Fuente: Análisis en Laboratorio ECOQUIMSA. informe emitido el 23 de junio de 2020 con código de muestras de la 20-1889-1 a la 20-1889-6.

Figura 21. Descripción de contenido de metales pesados en compost MM-F.



Fuente: Análisis en Laboratorio ECOQUIMSA. informe emitido el 23 de junio de 2020 con código de muestras de la 20-1889-1 a la 20-1889-6.

## 9.2. Costo/beneficio de la producción de compost a base de *H. verticillata*

Tabla 25. Costo/Beneficio de la producción de 100 t de compost MO-E y MO-F.

Material	Unidad	Cantidad	Precio (Q)	Total (Q)
<b>Costo</b>				
Hydrilla verticillata	Tonelada	22	0	0
Broza	Tonelada	12.5	0	0
Rastrojo	Tonelada	12.5	0	0
Suelo	Tonelada	12.5	0	0
Residuos orgánicos	Tonelada	188	0	0
Transporte	lanchas	2	50	100
Transporte	Pick-up	4	25	100
Combustible	Galones	6	30	180
Personal	Jornalero	12	2 800	33 600
Capacitación al personal	Talleres	3	100	300
Material de labranza	Varios	1	1 000	1 000
<b>Total</b>				<b>35 280</b>
<b>Beneficio</b>				
Venta de compost	1 Kg	100 000	2.25	225 000
<b>Sumatoria</b>				
<b>Diferencia total</b>				<b>189 720</b>

Fuente: Elaboración propia tomando cuenta los datos de (Díaz, Barillas, Sandoval, & Cojón, 2018 & Ministerio de Ambiente y recursos naturales, 2006)

Tabla 26. Costo/Beneficio de la producción de 100 t de compost LC-E y LC-F.

Material	Unidad	Cantidad	Precio (Q)	Total (Q)
<b>Costo</b>				
Hydrilla verticillata	Tonelada	22	0	0
Broza	Tonelada	12.5	0	0
Rastrojo	Tonelada	12.5	0	0
Suelo	Tonelada	12.5	0	0
Lombrices	Libras	1 600	50	80 000
Transporte	lanchas	2	50	100
Transporte	Pick-up	4	25	100
Combustible	Galones	6	30	180
Personal	Jornalero	12	2 800	33 600
Capacitación al personal	Talleres	3	100	300
Material de labranza	Varios	1	1 000	1000
<b>Total</b>				<b>115 280</b>
<b>Beneficio</b>				
Venta de compost	1 Kg	100 000	2.25	225 000
<b>Sumatoria</b>				
<b>Diferencia total</b>				<b>109 720</b>

Fuente: Elaboración propia tomando cuenta los datos de (Díaz, Barillas, Sandoval, & Cojón, 2018 & Ministerio de Ambiente y recursos naturales, 2006)

Tabla 27. Costo/Beneficio de la producción de 100 t de compost MM-E y MM-F.

Material	Unidad	Cantidad	Precio (Q)	Total (Q)
<b>Costo</b>				
Hydrilla verticillata	Tonelada	22	0	0
Broza	Tonelada	12.5	0	0
Rastrojo	Tonelada	12.5	0	0
Suelo	Tonelada	12.5	0	0
Microorganismos de montaña	Galones	6000	18	108 000
Transporte	lanchas	2	50	100
Transporte	Pick-up	4	25	100
Combustible	Galones	6	30	180
Personal	Jornalero	12	2 800	33 600
Capacitación al personal	Talleres	3	100	300
Material de labranza	Varios	1	1 000	1 000
<b>Total</b>				<b>143 280</b>
<b>Beneficio</b>				
Venta de compost	1 Kg	100 000	2.25	225000
<b>Sumatoria</b>				
<b>Diferencia total</b>				<b>81 720</b>

Fuente: Elaboración propia tomando cuenta los datos de (Díaz, Barillas, Sandoval, & Cojón, 2018 & Ministerio de Ambiente y recursos naturales, 2006)

## 10. DISCUSIÓN

Para el análisis de metales pesados arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) en los seis compost hechos a base de *Hidrilla verticillata* se prepararon las muestras, con las características que se presentan en la tabla 19, mediante la técnica de digestión ácida basada en el método EPA 3050B y EPA 7471B, mientras que, para la cuantificación de metales, se utilizó la técnica de espectrometría de absorción atómica basada en el método PRO53-LAB, propio de los Laboratorios de ECOQUIMSA (Ver anexo 1-6). En la tabla 21 se presenta la concentración de cada metal en las seis muestras de compost a base de *H. verticillata* analizados y en la tabla 22 se muestran los rangos de concentración aceptables de los metales estudiados que puede contener un abono orgánico o compost, según la Norma NTC 5167, la Norma CCPAE 17-10-2003 y el Acuerdo gubernativo 236-2006 de la República de Guatemala.

### 10.1. Arsénico (As)

El estudio de As y Hg en sedimentos del lago de Atitlán realizado en 2015 (Pérez-sabino, y otros, 2015), se encontraron concentraciones de As arriba de 1000 µg/L y en el último estudio de metales en plantas acuáticas características del lago de Atitlán realizado en 2009 (Oliva, Pérez, Del Cid, Martínez, & Valladares, 2010), reportó una concentración de As acumulado en *H. verticillata* de 72.5 mg/Kg (tabla 5), indicando valores superiores a los límites permitidos en compost (tabla 22). El As se encuentra presente en el Lago de Atitlán en gran parte por la naturaleza geológica de la cuenca, por lo que la acumulación de este metal en aguas, sedimentos e *H. verticillata* debería de mantenerse constante o con valores aproximados a los del estudio mencionado anteriormente. De tal forma que se consideró este valor durante la preparación de los seis prototipos de compost. Al evaluar la concentración de arsénico (As) se observa que los niveles de concentración rondaron entre 0.723 mg/Kg (MO-F) y 0.955 mg/Kg (LC-F), valores que se encuentra muy por debajo del máximo permisible para las dos normas y el acuerdo gubernativo de referencia.

En la figura 12 se puede visualizar de forma gráfica la comparación de valores entre el contenido de arsénico en la muestra y lo establecido por las normas, en la que se utilizó escala logarítmica por el contraste entre resultado-parámetros (ver tabla 23 y 24). Se puede estimar que alrededor del 0.997 % y el 1.300 % del contenido total de As en la *H. verticillata* prevaleció en el proceso de compostaje. El As no es biodegradable, por lo que la pérdida de parte significativa de este metal puede deberse a que, al desintegrarse cada órgano de la planta, se liberan los compuestos metálicos solubles, generalmente en forma de iones, quelatos o complejos organometálicos que, fácilmente pueden ser arrastrados por los lixiviados del compost. En este caso se esperaría encontrar al As en solución, mayormente en su forma As (III) y en menor proporción en su forma As (V) (Srivastava, Mishra, Tripathi, Dwivedi & Tandon, 2007). Por otro lado, el valor promedio de la concentración de este metal es de  $0.826 \pm 0.007$  mg/Kg, siendo todos los valores cercanos entre sí y sin presentar una tendencia basada en el tratamiento recibido, preliminarmente puede descartarse que la pérdida del metal sea dependiente del tratamiento de cada compost ya sea con la técnica de Microorganismos de montaña (MM), vermicompost (LC) o materia orgánica (MO).

## **10.2. Cadmio (Cd)**

En cuanto a la concentración de cadmio (Cd) se observa que los niveles de concentración rondaron entre 0.590 mg/Kg (MO-F) y 1.090 mg/Kg (MM-E), valores que se encuentra por debajo del máximo permisible para dos de los tres parámetros tomados en cuenta (Norma NTC 5167 y Acuerdo gubernativo 236-2006 de la República de Guatemala), pues la Norma CCPAE 17-10-2003 no sugiere un valor de concentración máximo permisible para la presencia de cadmio en abono orgánico o compost. La comparación de valores entre el contenido de cadmio en las seis muestras y lo establecido por las normas se puede visualizar de forma gráfica en la figura 13, en la que se utilizó escala logarítmica por el contraste de valores resultado-parámetros (ver tabla 23 y 24).

El último estudio de metales en plantas acuáticas características del lago de Atitlán realizado en 2009 (Oliva, Pérez, Del Cid, Martínez, & Valladares, 2010), reportó una concentración de Cd acumulado en *H. verticillata* de 80.5 mg/Kg (tabla 5), considerando que, si la acumulación de metales en la planta mantuvo valores aproximados al de este estudio durante la preparación de los seis prototipos de compost, se puede estimar que alrededor del 0.733 % y 1.354 % del contenido total de Cd en la planta prevaleció en el proceso de compostaje. El Cd no es biodegradable, y se acumula en los tejidos de la planta y se asocia con la inducción de los péptidos quelantes de metales, las fitoquelatinas (PC), para hacer frente a los altos niveles de Cd en las células (Srivastava, Mishra, Tripathi, Dwivedi & Tandon, 2007), por lo que la pérdida de parte significativa de este metal, puede deberse a la desintegración de los tejidos, liberando los compuestos quelatos que, fácilmente pueden ser arrastrados por los lixiviados del compost. Por otro lado, el valor promedio de la concentración de este metal es de  $0.863 \pm 0.033$  mg/Kg, siendo estos valores cercanos entre sí, sin presentar una tendencia clara basada en el tratamiento recibido, por lo que preliminarmente se puede descartar que la pérdida del metal sea dependiente del tratamiento de cada compost (MO, LC o MM).

### **10.3. Mercurio (Hg)**

Los resultados de mercurio (Hg) presentan a la muestra de menor concentración, con valor por debajo del límite de detección ( $<0.0006$  mg/Kg, MO-F) y la muestra de mayor concentración con un valor de 0.060 mg/Kg (MM-E). Las seis muestras por debajo del máximo permisible para los tres parámetros considerados. La comparación de valores entre el contenido de arsénico y lo establecido por las normas se puede visualizar de forma gráfica en la figura 14, en la que se utilizó escala logarítmica por el contraste de valores resultado-parámetro (ver tabla 23 y 24). El estudio de As y Hg en sedimentos del lago de Atitlán realizado en 2015 (Pérez-Sabino, y otros, 2015), reportó una concentración de Hg de 3.81  $\mu\text{g/L}$ . La particularidad con el mercurio es el nivel de tolerancia de la *H. verticillata* ante este metal, por lo que puede soportar una concentración de 1.0 M absorbida tanto de las aguas como de los sedimentos (Tripathi, et al., 1997).

Por la cantidad de *H. verticillata* agregada a la mezcla para preparar el compost, la concentración de Hg podría verse incrementada. Sin embargo, los resultados, presentaron niveles que representan desde un 0.016 % a 1.575 % del contenido total de Hg encontrado en sedimentos. El Hg no es biodegradable, por lo que la pérdida de parte significativa de este metal, puede deberse a que la desintegración de cada órgano de la planta, liberaría al mercurio que, al estar en su forma elemental, se caracteriza por su potencial de liberación de vapores de mercurio a temperatura ambiente, mientras que en su forma  $Hg^{+1}$  y  $Hg^{+2}$  puede presentarse en forma soluble, generalmente como iones, quelatos o complejos organometálicos, facilitando su arrastre por los lixiviados del compost. Por otro lado, el valor promedio de la concentración de este metal es de  $0.027 \pm 0.001$  mg/Kg, indicando valores de concentración en los compost cercanos entre sí y sin presentar una tendencia clara basada en el tratamiento recibido, por lo que preliminarmente se puede descartar que la pérdida del metal sea dependiente del tratamiento de cada compost (MO, LC o MM).

#### **10.4. Plomo (Pb)**

Los niveles de concentración de plomo (Pb) se encuentran entre 6.540 mg/Kg (MM-F) y 20.540 mg/Kg (LC-E), valores que se encuentra por debajo del máximo permisible para los tres parámetros tomados en cuenta. La comparación de valores entre el contenido de arsénico y lo establecido por las normas se puede visualizar de forma gráfica en la figura 15, en la que se utilizó escala logarítmica por el contraste de valores entre resultado-parámetro (ver tabla 23 y 24). El último estudio de metales en plantas acuáticas características del lago de Atitlán realizado en 2009 (Oliva, Pérez, Del Cid, Martínez, & Valladares, 2010), reportó una concentración de Cd acumulado en *H. verticillata* de 224 mg/Kg (tabla 5), un valor por encima del límite permisible para compost, establecido por las dos normas y el acuerdo gubernamental, tomados como referencia para determinar la funcionalidad de los seis prototipos hechos a base de *H. verticillata*.

De tal forma que, si la acumulación de metales en la planta mantuvo valores aproximados al de este estudio durante la preparación de los seis prototipos de compost, se puede estimar que alrededor del 2.916 % y el 9.169 % del contenido total de Pb en la planta prevaleció en el proceso de compostaje. El valor promedio de la concentración de este metal es de  $9.900 \pm 2.057$  mg/Kg, estos presentan valores presentan una tendencia dependiente del tratamiento de cada compost (MO, LC o MM). El tratamiento con mayor concentración de plomo fue el compostaje con lombrices (vermicompost o lombricompost) y presentó una concentración de 20.540 mg/Kg en LC-E y 9.360 mg/Kg para LC-F, mientras que el de menor concentración fue el tratamiento con microorganismos de montaña, con concentración de 6.700 mg/Kg en MM-E y de 6.540 mg/Kg en MM-F. La lombriz californiana, coqueta roja o *Eisenia andrei*, es capaz de acumular plomo en su organismo y su concentración en los tejidos varía según los días de exposición, pues este metal se acumula de forma gradual hasta los 21 días. A partir de ese tiempo, comienza a eliminarlo y bajan las concentraciones de este metal en el cuerpo de las lombrices, existiendo diferencias significativas entre los 7 y los 21 días (Reinecke & Reinecke, 2003, & Loza, 2007). En el proceso de compostaje para LC-E y LC-F, la etapa mesófila tuvo lugar antes de los 21 días de acumulación del metal (durante los primeros 15 días) (Díaz, Barillas, Sandoval, & Cojon, 2018). En esta etapa se descompone una gran proporción de la materia prima y se liberan los compuestos de plomo disponibles en el compost y son disueltos en los lixiviados, mientras que los compuestos de plomo acumulados por *Eisenia andrei*, se liberaron a partir de los 21 días, de forma gradual, provocando una mayor concentración en el compost resultante de estos tratamientos.

En cuanto a los tratamientos con microorganismos de montaña, los metales no son simplemente tóxicos, sino que su presencia puede inducir mecanismos de resistencia de metales variados en microorganismos. Se defienden contra la infiltración de iones de metales pesados interactuando activa o pasivamente con ellos y posteriormente desarrollando medios de protección. La interacción de microbios y iones metálicos puede ocurrir por diversos mecanismos clasificados

según la participación del metabolismo y sus interacciones (Alluri, y otros, 2007). Las sustancias poliméricas extracelulares son una mezcla compleja de biopolímeros microbianos de alto peso molecular. Se componen principalmente de proteínas, polisacáridos, ácidos urónicos, sustancias húmicas, lípidos, etc. Uno de sus componentes esenciales es el exopolisacárido (EPS) liberado en defensa propia contra las duras condiciones de inanición, pH y temperatura. Su composición aniónica neta permite al biopolímero secuestrar efectivamente iones de metales pesados cargados positivamente, proceso conocido como biosorción (Gupta & Batul, 2016). Según las interacciones de las células, se sintetizan compuestos de metales en formas biológicamente menos tóxicas, menos disponibles, o las inmovilizan para evitar su ruptura en los sistemas biológicos. Siendo esta la posible causa por la que los tratamientos con microorganismos de montaña presenten menor concentración de plomo.

Por otro lado, se evidencia que los tres tratamientos (MO, LC o MM) con *H. verticillata* entera (terminación -E) presentaron mayor concentración de plomo que en los compost con *H. verticillata* fraccionada (terminación -F). La principal diferencia entre ambos procesos es que la *H. verticillata* fraccionada fue cortada en fragmentos de aproximadamente 15 cm previo al proceso de compostaje (Díaz, Barillas, Sandoval, & Cojon, 2018). Este corte, ayuda a que la desintegración de la materia orgánica y por ende, la liberación de plomo se dé con mayor efectividad. Mientras que en el proceso con *H. verticillata* entera, la desintegración de las células vegetales es más lenta y tiende a retener el metal, provocando que este no esté disponible para los lixiviados, los microorganismos o para *E. andrei* (Sánchez, F., 2011). Por lo que el plomo atrapado pudo ser liberado hasta la digestión de las muestras, en la parte analítica de los metales, pues el principal objetivo de este proceso es la descomposición completa de la materia orgánica, dejando así disponibles los compuestos de plomo, evidenciando mayor contenido de este en las muestras trabajadas con materia prima entera (Gallego, 2011), como se observa en la tabla 21 y la figura 15.

## 10.5. CARACTERIZACIÓN DEL CONTENIDO DE ARSÉNICO, CADMIO, MERCURIO Y PLOMO DE CADA COMPOST

Los seis compost hechos a base de *H. verticillata* (MO-E, MO-F, LC-E, LC-F, MM-E y MM-F) muestran valores pequeños de desviación estándar en la retención de los metales arsénico (As), cadmio (Cd) y mercurio (Hg), mientras que la retención de plomo, presentó una variación estándar mayor, la cual se amplía en la sección 10.4 y como se observa en la las figuras de la 16 a la 21.

Los compost que presentan menor contenido de los cuatro metales son MO-F y MM-F, mientras que los que presentan mayor contenido son LC-E y LC-F, que coincide con la bioacumulación de metales por parte de *Eisenia andrei* y los mecanismos de defensa desarrollados por los microorganismos de montaña descritos en la sección 10.4. Siendo el orden creciente de contenido de metales en los seis compost es: MM-F < MO-F < MM-E < MO-E < LC-F < LC-M. Además, el estudio de Manejo de residuos de *H. verticillata* y su aprovechamiento como materia prima para la elaboración de abono orgánico en San Pedro la Laguna, Sololá, describe el orden decreciente de la efectividad de los seis tratamientos de la siguiente forma: MM-F > LC-E > LC-F > MM-E > MO-E > MO-F (Díaz, Barillas, Sandoval, & Cojon, 2018). Al considerar ambas características se evidencia que el tratamiento con microorganismos de montaña e *H. verticillata* fraccionada (MM-F) es el método con mayor eficiencia y con menor contenido de metales, siendo así el prototipo que en este primer estudio evidencia mejor resultados.

Sin embargo, llevar una réplica de este estudio, ayudaría a indagar sobre el recorrido de los metales, la presencia de estos tanto en *H. verticillata* en el punto de partida, como la interacción de los mismos en su bioacumulación en *E. andrei*, sus interacciones con los microorganismos de montaña y la solución de compuestos metálicos en los lixiviados, con lo cual se podría encontrar un método de recuperación de metales y a su vez confirmar los resultados de este estudio.

## 10.6. COSTO/BENEFICIO DE LA PRODUCCIÓN DE CADA COMPOST

De la tabla 25 a la tabla 27 se muestra el detalle costo/beneficio para la producción y venta de 100 toneladas de compost para cada uno de los tratamientos, materia orgánica (MO-E y MO-F), lombricompost (LC-E y LC-F) y microorganismos de montaña (MM-E y MM-F), respectivamente. Se consideró el valor de 100 toneladas por año como referencia según lo establecido por el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 de la República de Guatemala, indicando en el artículo 43, que los lodos que presenten metales pesados y que se ajusten a los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 42 (ver tabla 11 o tabla 22), se permite disponer su aplicación como abono hasta cien mil kilogramos (equivalente a 100 toneladas) por hectárea por año (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2008). Los seis prototipos de compost resultantes a base de *H. verticillata* se ajustan a los límites máximos permisibles por este acuerdo y se trabajaron en el departamento de Sololá, Guatemala, por lo que los cálculos sobre este valor pueden dar una mejor idea del comportamiento económico de la producción de los compost. El análisis costo/beneficio para la producción de 100 toneladas (o su equivalente, 100 000 kg) por año de cada uno de los tratamientos, indica que el precio por kg de compost sería de Q 2.25, resulta con un ingreso de Q 225 000.00 en la venta de su totalidad.

En cuanto a los costos, los tres diferentes tratamientos (MO, LC y MM) coinciden en ciertos parámetros, a continuación, descritos. Se tomó en cuenta que el municipio de San Pedro la Laguna, Sololá, cuenta con una planta de tratamientos de desechos sólidos, en donde se esperaría poner en marcha el proyecto, por lo que el costo de maquinaria y equipo para la preparación de un espacio de trabajo, no se tomó en cuenta. Además, para la recolección de *H. verticillata* se han formado grupos de personas voluntarias dedicadas a la limpieza y recolección de esta planta en las orillas de la playa Tza'n Kaqajaay, por lo que al momento la materia prima no tiene un costo asignado. Los costos para tomar en cuenta para la recolección de esta planta son los referentes a la mano de obra del jornalero, el combustible y el transporte de *H. verticillata* desde la playa hacia

la planta de tratamientos de desechos sólidos, en el que se considera dos lanchas, para la movilización de planta desde zonas más profundas del lago, hacia la orilla y el transporte terrestre en tres pick-ups desde este punto hacia la planta de tratamientos de desechos sólidos municipal.

La broza, el rastrojo y el suelo, estas ya se recolectan para los tratamientos ya existentes en el municipio, recuperadas en zonas específicas, en la materia prima no tiene costo, por lo que el único costo es la mano de obra de el/los jornaleros/s. Por otro lado, se toma en cuenta material de labranza y mantenimiento de cada tratamiento, para el movimiento y riego del compost. En este análisis costo/beneficio, se toma en cuenta a un jornalero con horario completo, trabajando durante 12 meses y las capacitaciones respectivas (tabla 27).

El precio de costo de compost varió para los tres tratamientos (MO, LC y MM). Esta variación es dependiente del material específico de cada uno de ellos. Para el tratamiento con materia orgánica, la recolección de materia prima se realizó con desechos orgánicos colectados del basurero municipal, que contiene material proveniente de la actividad antropológica urbana y los desechos recolectados de la actividad venta/compra en el mercado municipal. Por lo que el costo de este tratamiento no recae en la materia prima sino únicamente en el transporte terrestre, en el que se considera un viaje en pick-up. Como resultado, este tratamiento es el más económico con un total de costos de Q 35 280.00, dejando así una ganancia de Q 189 720.00 y una relación beneficio/costo de 6.4. Aunque, en el inciso 10.5 se establece a este tratamiento, sobre todo en el tratamiento con *H. verticillata* fraccionada como uno de los compost con menor concentración de metales, también se identifica como el tratamiento menos efectivo.

Para el tratamiento con lombrices, *Eisenia andrei*, la compra de lombrices tuvo un costo de Q 50.00 por libra y al considerar la preparación de 100 toneladas, el costo total sería de Q 80 000.00. Como resultado, este tratamiento presenta un costo intermedio con un total de costos de Q 115 280.00, dejando así una

ganancia de Q 109 720.00 y una relación beneficio/costo de 1.9. En el inciso 10.5 se establece a este tratamiento, tanto al aplicar *H. verticillata* entera o fraccionada como los compost con mayor concentración de metales y con una efectividad media alta.

Para el tratamiento con microorganismos de montañas, la compra de microorganismos tuvo un costo de Q 18.00 el galón y al considerar la preparación de 100 toneladas, el costo total sería de Q 108 000.00. Como resultado, este tratamiento es el menos económico con un total de costos de Q 143 280.00, dejando así una ganancia de Q 81 720.00 y una relación beneficio/costo de 1.6. En el inciso 10.5 se establece a este tratamiento, sobre todo en el que *H. verticillata* se aplica fraccionada como uno de los compost con menor concentración de metales y como el más efectivo.

## 11. CONCLUSIONES

- 11.1. Cinco prototipos de compost hechos a base de *H. verticillata* (MO-E, MO-F, LC-E, LC-F y MM-F) presentaron cuatro metales disponibles, arsénico, cadmio, mercurio y plomo; mientras que el compost MM-E evidenció tres metales disponibles, arsénico, cadmio y plomo.
- 11.2. Los seis prototipos de compost hechos a base de *H. verticillata* presentaron valores menores a los establecidos por el acuerdo con la norma NTC 5167, la norma CCPAE versión 17-10-2003 y el Acuerdo gubernativo 236-2006 de la República de Guatemala, indicando que son aptos para el uso agrícola. Sin embargo, la presencia de arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) en los compost, pueden ocasionar la acumulación de metales tóxicos en los suelos y sus productos, por lo que el Acuerdo gubernativo 236-2006 establece que, en caso de la aplicación como abono, se permitirá disponer de hasta cien mil kilogramos por hectárea por año.
- 11.3. La retención del arsénico, cadmio, mercurio y plomo en los seis prototipos de compost presentan entre el 0.016 % (Hg en MO-F) y el 9.169 % (Pb en LC-E) de la concentración de estos metales en *H. verticillata* reportados en estudios anteriores. La pérdida del As, Cd, Hg<sup>+1</sup>, Hg<sup>+2</sup> y Pb se da por diferentes rutas, principalmente por la formación de compuestos solubles en agua que pueden perderse fácilmente en los lixiviados en el proceso de descomposición de la materia orgánica, por otro lado, el mercurio elemental se libera por volatilización.
- 11.4. La concentración de As, Cd y Hg no presentan una tendencia dependiente del tipo de compostaje (LC, MO, MM) por el que haya pasado el producto final. La concentración de Pb presenta una tendencia con mayor acumulación en los productos de lombricompost con concentraciones de 4.312 (LC-E) y 3.970 (LC-F).

- 11.5. El orden creciente de contenido de metales en los seis compost es: MM-F < MO-F < MM-E < MO-E < LC-F < LC-M. El orden decreciente de la efectividad de los seis tratamientos es: MM-F > LC-E > LC-F > MM-E > MO-E > MO-F. Al considerar ambas características se evidencia que el tratamiento con microorganismos de montaña e *H. verticillata* fraccionada (MM-F) es el método con mayor eficiencia y con menor contenido de metales, siendo así el prototipo que evidencia mejores resultados.
- 11.6. La variación del costo de compost de los tres tratamientos (MO, LC y MM) es dependiente del material específico de cada uno de ellos.
- 11.7. Los tratamientos con materia orgánica (MO-E y MO-F) presentaron costo de producción de Q 35 280.00, ganancia de Q 189 720.00 y relación beneficio/costo de 6.4, siendo el más económico de producir y con mayor ganancia. El compost MO-F es uno de los compost con menor concentración de metales y con menor efectividad.
- 11.8. Los tratamientos con lombrices, *Eisenia andrei* (LC-E y LC-F) presentaron un costo de producción de Q 115 280.00, ganancia de Q 109 720.00 y relación beneficio/costo de 1.9. Presentan la mayor concentración de metales y una efectividad media alta.
- 11.9. Los tratamientos con microorganismos de montaña (MM-E y MM-F) presentaron un costo de producción de Q 143 280.00, ganancia de Q 81 720.00 y relación beneficio/costo de 1.6, este es el tratamiento menos económico de producir y con menor ganancia. El tratamiento con *H. verticillata* fraccionada es uno de los compost con menor concentración de metales y con mayor efectividad.

## 12. RECOMENDACIONES

- 12.1. Realizar una réplica de esta investigación para 1 tonelada de compost de cada tratamiento (MO, LC y MM), utilizando únicamente procesos con *H. verticillata* fraccionada. En estos se debe poner principal atención al tratamiento MM-F, tanto por su efectividad y por ser el compost que presentó menor concentración de metales.
- 12.2. En la réplica de la investigación, identificar el recorrido de los metales, arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) evaluando el contenido de estos en las aguas del Lago de Atitlán, cercanas a la playa del cantón T´zan Kaqaajay, evaluar su contenido en la materia prima (*H. verticillata* y materia orgánica), en los lixiviados, en lombrices, en los microorganismos de montaña y en los compost resultantes.
- 12.3. Evaluando el recorrido de los metales, identificar uno o varios métodos de separación y recuperación de arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb), dependiendo en dónde prevalezca la acumulación de los metales.

### 13. REFERENCIAS

1. Alluri, H., Ronda, S., Settalluri, V., Bondili, J., Suryanarayana, V., & Venkateshwar, P. (2007). Biosorption: An eco-friendly alternative for heavy metal removal. . *African Journal of Biotechnology*.
2. AMSCLAE. (2015). *Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno*. Obtenido de Informe de vegetación acuática en el Lago de Atitlán 2015: <http://amsclae.gob.gt/descargas/informesdica2015/vegetaciónacuatica.p>
3. Arenas, C., Pardo, G., Vásquez-Urbez, M., Aunqué, L., Sancho, C., & Osácar, C. (2010). Geología . *Sociedad Geológica de España*.
4. ATSDR. (1999). Resumen de Salud Pública. *Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades, División de Toxicología y Medicina Ambiental*.
5. Baker, A., McGrath, S., Reeves, R., & Smith, J. (2000). Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils. *Phytoremediation of contaminated soil and water*, 85-107.
6. Barceló, J., Poschenrieder, C., Lombini, A., Llugany, M., Bech, J., & Dinelli, E. (2001). Mediterranean plant species phytoremediation. *Universidad complutense Madrid*, 23.
7. Best, & Boyd. (1996). A simulation model for growth of the submersed aquatic macrophyte *Hydrilla verticillata* L. F. Royle. *Technical Report A-96-8*.
8. Beuchat, L. (2006). Vectors and condition for preharvest contamination of fruits and vegetables with pathogens capable of causing enteric diseases. *British food journal*.
9. Binimelis, R., Monterroso, I., & Rodriguez, B. (2007). A social analysis of the bioinvasions of *Dreissena polymorpha* in Spain and *Hydrilla verticillata* in Guatemala. *Environ Manage* 40. Doi:10.1007/s00267-0060206-x.
10. Bisinoti, M., & Jardim, W. (2004). O comportamento do metilmercurio no ambiente. *Química Nova*, 593-600.
11. Bleeker, P., Hakvoort, H., Blick, M., Souer, E., & Schat, H. (2006). Enhanced arsenate reduction by a CDC25-like tyrosine phosphatase explains

- increased phytochelatin accumulation in arsenate-tolerant. *Plant Journal* 45, 917-929.
12. Bonilla, J., & Santamaría, B. (2013). *Biodiversidad*. Obtenido de Plantas acuáticas exóticas y traslocadas invasoras: <https://www.biodiversidad.gob.mx/especies/invasoras/pdf/acuaticas-invasoras-cap13.pdf>
  13. Burriel F., Lucena, F. Arribas, S. & Hernández, J. 2006. Química Analítica cualitativa. 18va edición. Thomson. pp. 435-450
  13. Carbonell, A., M., A., Delaune, R., R., G., & W., P. (1998). Bioavailability and uptake of arsenic by wetland vegetation: effects on plant growth and nutrition. *J. Environ Sci Health*.
  14. Carrascal, A., Castañeda, R., & Pulido, A. (2011). Perfil de riesgo Salmonella app en pollo entero y en piezas. *Salud INd*.
  15. Castellanos, J., Uvalle-Bueno, J., & Aguilar-Santelises, A. (2000). Manual de interpretación de análisis de suelos, aguas, agrícolas, plantas y ECP. *INIFAP*.
  16. CCPAE. (2003). Cuaderno de Normas del Consell Catalá de la Producción Agraria Ecológica.
  17. CDDS. (2006). Plan estratégico territorial de la Cuenca de Atilán, Sololá, Guatemala. *Consejo de desarrollo del departamento de Sololá*.
  18. Cho, C., Yavuz-Corapcioglu, M., Park, S., & Sung, K. (2008). Effects of grasses on the fate of VOCs in Contaminated soil and air. *Water, Air & Soil Pollution*, 243-250.
  19. COMSA. (2015). Manual de tecnologías orgánicas: preparados básicos. *Café Orgánico Marcla S. A*.
  20. Dengo, G. (1973). Estructura geológica, historia tectónica y morfología de América Central. *Centro Regional de Ayuda Técnica*, 52.
  21. Díaz, A., Barillas, M., Sandoval, D., & Cojon, E. (2018). Manejo de residuos de Hydrilla verticillata y su aprovechamiento como materia prima para la elaboración de abono en San Pedro la Laguna, Sololá. *EPSUM*, 1-28.
  22. Dix, M., Fortin, I., & Medinilla, O. (2003). Diagnóstico ecológico social en la cuenca de Atilán. *Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala/ Te Nature conservancy*, 83.

23. Eapen, S., Singh, S., & D`Souza, S. (2007). Advances in development of transgenic plants for remediation of xenobiotic pollutants. *Biotechnology Advances*, 442-451.
24. EGMASA. (2000). Investigación y desarrollo tecnológico de proceso de compostaje y aplicación de compost en los sectores agrícola y forestal. *GEMAP*, 1-4.
25. EGMASA. (2000). Investigación y desarrollo tecnológico de procesos de compostaje y aplicación del compost en los sectores agrícola y forestal. *Empresa de Gestión Medioambiental, Consejería de medio ambiente*.
26. El-Grendy, A., Biswas, N., & Bewtra, J. (2006). Municipal landfill leachate treatment for metal removal using water hyacinth in floating aquatic system. *Water Environ Res*.
27. Emsley, J. (2001). *Nature's building blocks*. USA: Oxford University Press.
- Emsley, J. (2003). *Natures's Building Blocks: an A-Z guide to the elements*. Inglaterra: Oxford University Press.
28. FAO. (2003). On-farm composting methods. *FAO, Rome*.
29. FAO. (2010). *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*. Obtenido de El Suelo: <http://www.fao.org/3/w1309s/w1309s04.htm>
30. Filippis, L. (1979). The effect of heavy metal compounds on the permeability of Chlorella cells. *Bd. 92*, 39-49.
31. Foa, V., Colombi, A., & Maroni, M. (1984). The speciation of the chemical forms of arsenic in the biological monitoring of exposure to inorganic arsenic. *Sci total environ*, 241-259.
32. Gallego, E. (2011 de agosto de 2011). *CookBook Laboratory*. Obtenido de Aplicación Estandarizada EPA3051A en Digestores por Microondas Berhof: <https://www.cookbooklaboratory.com/aplicacion-estandarizada-epa3051a-en-digestores-por-microondas-berghof/>
33. Garg, P., Tripathi, R., Rai, U., Sinha, S., & Chandra, P. (1997). Cadmium accumulation and toxicity in submerged plant hydrilla verticillata (l. f.) Royle. *Environmental Monitoring an Assessment* 47, 167-173.

34. Gilmour, C., Riedel, G., Ederington, M., Bell, J., Benoit, J., Gill, G., & Stordal, M. (1998). Methylmercury concentration and production rates across a trophic gradient in the northern Everglades. *Biogeochemistry*, 327-345.
35. GM. (2013). Estudio hidrogeológico y de recarga en la cuenca del lago de Atitlán (Guatemala). *Geólogos del mundo*.
36. Guillizoni, P. (1991). The Role of heavy metals and toxic materials in the physiological ecology of submerged macrophytes. *Aquatic Botany*.
37. Gupta, M., & Chandra, P. (1996 ). Bioaccumulation and Physiological Changes in *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle in Response to mercury. *Environmental Contamination and toxicology* 56, 319-326.
38. Gupta, P., & Batul, D. (2016). Bacterial exopolysaccharide mediated heavy metal removal: A review on biosynthesis, mechanism and remediation strategies. *Biotechnology reports*.
39. Hall, J. (2002). Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *J. Exp. Bot*, 1-11.
40. Holaday, A., & Bowes, G. (1980). Acid metabolism and dark CO<sub>2</sub> fixation in a submersed aquatic macrophyte (*Hydrilla verticillata*). *Plant Physiol*.
41. Holmes, A., & Colmes, D. (1980). *Geología Física*. Barcelona, España: 812.
- ICONTEC. (2011). Norma Técnica Colombiana NTC5167: Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*.
42. IGAC. (2007). Normas y especificaciones de levantamientos de suelo. *Instituto geográfico Agustín Codazzi, CO*, 62.
43. IGN. (1972). Atlas nacional de Guatemala, Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas. *Instituto Geográfico Nacional*, 40.
44. INE. (2003). Censo nacional agropecuario. *Instituto Nacional de Estadística de Guatemala*.
45. INE. (2014). Caracterización departamental, Sololá 2013. *Instituto Nacional de Estadística Guatemala*.
46. Ingole, N., & Bhole, A. (2003). Removal of heavy metals from aqueous solution by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) . *J Water SRT*.

47. INSIVUMEH. (2004). Atlas hidrológico de la República de Guatemala. *Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, GT.*
48. Islam, M., Doyle, M., Phatak, S., Millner, P., & Jiang, X. (2005). Survival of *Escherichia coli* 0157:H7 in soil and on carrots and onions grown in fields treated with contaminated manure composts or irrigation water. *Food microbiology.*
49. ITURRALDE-VINENT, M. (2006). El origen paleográfico de la biota de Guatemala. Biodiversidad de Guatemala. *Universidad del Valle de Guatemala*, 1-6.
50. Jensen, W. (2008). Is Mercury Now a Transition Element? *Journal of Chemical Education* , 62-85.
51. Kamal, M., Mahmoud, N., & Cote, R. (2004). Phytoaccumulation of heavy metals by aquatic plants. *Environment international*, 89-96.
52. Kappus, H. (1985). Lipid peroxidation: mechanisms, analysis, enzymology and biological relevance. *Academic Press*, 273-310.
53. Kelley, C., Gaither, K., Baca-Spry, A., & Cruickshank, B. (2000). Incorporation of phytoremediation strategies into the introductory chemistry laboratory. *Chem education*, 140-143.
54. Krämer, U., Cotter-Howells, J., Charnock, J., Baker, A., & Smith, J. (1996). Free histidina as a metal chelator in plants that accumulate nickel. *Nature*, 635-638.
55. Kumersan, M. & Riyazuddin, P. 2001. Overview of speciation chemistry of arsenic. *Curr. Sci.* 80: 837-846
55. L, & A. (1990). Agronomy handbook. Soil and plant analysis. *Agricultural Laboratories.*
56. La Bastille, A. (1988). Lago de Atitlán. *West of the wind publication.*
57. Le Roux, S., Turner, A., Millward, G., Ebdon, L., & Appriou, P. (2001). Partitioning of mercury onto suspended sediments in estuaries. *Journal of Environmental Monitoring*, 37-42.
58. Lenntech, B. (1988). Lago de Atitlán. *West of the Wind Publication.*
59. Lillo, J. (2008). *Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en aguas.* Obtenido de GEM, Grupo de Estudios de Minería y Medioambiente:

[http://www.aulados.net/GEMM/Documentos/Peligros\\_geoquimicos\\_As/Peligros\\_As\\_2.pdf](http://www.aulados.net/GEMM/Documentos/Peligros_geoquimicos_As/Peligros_As_2.pdf)

60. Loza, J. (2007). La lombriz de tierra, *Eisenia andrei* (Bouche, 1972) como bioacumulador de metales pesados (Pb) durante la transformación de los desechos sólidos orgánicos de Guadalajara, Jalisco, México. *Universidad de Guadalajara*.
61. Madsen, J. (1997). Methods for management of nonindigenous aquatic plants. *J.O. Assessment and Management of Plant Invasions Springer, New York*.
62. MAGA. (2001). Mapa fisiográfico-geomorfológico de la República de Guatemala -Memoria técnica- Programa de Emergencia por desastres naturales. *Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, Unidad de Políticas e Información Estratégica*, 109.
63. MAGA. (2002). Atlas temático de la República de Guatemala. *Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación*, 127.
64. MAGA. (2009). Mapa de clasificación climática de la República de Guatemala a escala 1:50 adaptado. *Unidad de planificación geográfica y gestión de riesgo -UPGGR-*, 195.
65. MAGA. (2013). Estudio semidetallado de los suelos del departamento de Sololá, Guatemala. *Convenio de cooperación No. 43-2006*.
66. Manson, R., Laporte, J., & Andres, S. (2000). Factors controlling the bioaccumulation of mercury methylmercury, arsenic, selenium and cadmium by freshwater invertebrates and fish. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 283-297.
67. Marín, R. (2003). *Fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos. Tratamiento y control de calidad de aguas*. España: Ediciones Díaz Santos, S. A.
68. MARN. (2003). *Informe nacional del estado del ambiente -GEO- Guatemala*. Obtenido de Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA/ORPALC):  
[http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/9259/\\_InformeNacionaldelEstadodelAmbiente-GeoGuatemala2003.pdf.pdf?sequence=3&isAllowed=y](http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/9259/_InformeNacionaldelEstadodelAmbiente-GeoGuatemala2003.pdf.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

69. MARN-URL/IARNA-PNUMA. (2009). *Inrome Ambiental del Estado*. Guatemala: Geo-Guatemala.
70. Marschner, H. (2002). Mineral nutrition of higher plants . *Academic Press, Amsterdam*.
71. McGrath, S., Zhao, F., & Lombi, E. (2001). Plant and rhizosphere processes involved in phytoremediation of methal-contaminated soils. *Plant and soil*, 207-214.
72. MEM. (27 de Noviembre de 2011). *Minerales y rocas industriales ubicación y su apariencia industrial*. Obtenido de <http://www.infoiarna.org.gt/media/file/areas/recursos/documentos>
73. Memon, S., Hou, X., & Wang, L. (2010). Morphological analysis of salt stress response of park Choi Electron. *J. environ. agric. food. chem*.
74. Mishra, S., Srivastava, S., Tripathi, R., Rumar, R., Seth, C., & Gupta, D. (2006). Lead detoxification by coontail (*Ceratophyllum demersum* L.) involves induction of phytochelatins and antioxidant system in response to its accumulation. *Chemosphere* 65, 1027.
75. MM. (2002). *Mapas del mundo*. Obtenido de <http://espanol.mapsofworld.com/continentes/norte-america/guatemala/departamentos/solola.html>
76. Morales, L. (2018). Estudio exploratorio de los niveles de metales pesados (As, Cd, Cr, Pb, Se) en el río Guatatoya, departamento de El Progreso. *Escuela de Química, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala*.
77. Naturales, M. d. (2006). ACUERDO GUBERNATIVO No. 236-2006. *Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos*.
78. Newhal, C. G. (1987). Geology of the Lake Atitlán region, western of Guatemala. *Darmoh College, Hanover*, 364.
79. Nuñez, L., & Martínez, V. (2011). Informe complementario de la cartografía geológica y geomorfológica (1:25,000) de la cuenca del Lago de Atitlán (Gutaemala). Proyecto Gestión Ambiental y de Riesgos en la Cuenca del

- Lago de Atitlán -GARICLA-. *Geólogos del Mundo y Asociación Vivamos Mejor-Agencia Española de Cooperación Internacional, Guatemala*, 69.
80. Oliva, B., Perez, J., Del Cid, B., Martinez, F., & Valladares, B. (2010). Estudio de contaminantes ecotóxicos en agua y organismos acuáticos del Lago de Atitlán (Inf 2009-064). *Dirección General de Investigación, Universidad de San Carlos de Guatemala, USAC*, 127-134.
  81. OMS. (1995). *Guías para la Calidad de Agua Potable*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.
  82. OPS. (2005). *Salud ambiental y riesgo volcánico*. Ecuador: Organización Panamericana de la Salud.
  83. Padín, O., & Iriart, N. (2003). Limnología. . *Departamento de ecología, Genética y evolución. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires*, 123-125.
  84. Pain, D. (1995). In Handbook of Ecotoxicology. *CRC Press/Lewis Publishers*.
  85. Pelicice, F., Agostinho, A., & Thomaz, S. (2005). Fish assemblages associated with Egeria in a tropical reservoir: investigating the effects of plant biomass and diel priod. *Acta Oecol*.
  86. Pérez-Sabino, F., Valladares-Jovel, B., Hernández, E., Oliva, B., Del Cid, M., & Jayes-Reyes, P. (2015). Determinación de arsénico y mercurio en agua superficial del lago de Atitlán. *Dirección General de Investigación -DIGI-*, 127-134.
  87. Pesacreta, G. (1988). Chemistry from North Carolina Piedmont impundments with Hydrilla L.f. Royle. *North Carolina State University, Raleigh*.
  88. PNUD, & SEGEPLAN. (2007). Plan de reconstrucción y reducción de riesgos del departamento de Sololá. *Programa de las Naciones Unidas Para el Desarrollo de Guatemala*.
  89. Prasad, K., Subramanian, V., & Paul, J. (2009). Purification of arsenite oxidase from Arthrobacter sp. . *Biometals* 22, 711-721.
  90. Ramirez, A. (2008). Intoxicación ocupacional de mercurio. *An. Fac. med.*, 46-51.

91. Reinecke, A., & Reinecke, S. (2003). The influence of exposure history to lead on the lysosomal response in *Eisenia fetida* (Oligochaeta). *Ecotoxicology and environmental safety*, 30-37.
92. Ríos, M. (2007). Caracterización y distribución de las macrófitas acuáticas del Lago de Atitlán en Sololá, Guatemala y su relación con los niveles de contaminación acuática física y química que podrían afectar su diversidad, abundancia y distribución. *Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas, Universidad Rafael Landívar -URL-*.
93. Robinson, M. (2002). Mass. Obtenido de Hydrilla: an invasive aquatic plant (Hydrilla verticillata): <https://www.mass.gov/files/documents/2016/08/ns/hydrilla.pdf>
94. Roldan, G. (1992). Fundamentos de limnología neotropical. *Editorial Universidad de Antioquía*, 527.
95. Román, P., Martínez, M., & Pantoja, A. (2013). Manual de compostaje del agricultor: Experiencias en América Latina. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*.
96. Román, P., Martínez, M., & Pantoja, A. (2013). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO): Manual de compostaje*. Santiago de Chile: Oficina Regional para América Latina y el Caribe.
97. Romero, M. (2013). Caracterización de las aguas residuales generadas en la cuenca del lago de Atitlán y su impacto. *Universidad Europea Miguel de Cervantes*.
98. Rosal, P., Pérez, M., & Arcos, M. (2007). La incidencia de metales pesados en compost de residuos sólidos urbanos y en su uso agronómico en España. *Información Tecnológica*.
99. Rose, W. (1987). *Quaternary silicic pyroclastic deposition of Atitlan caldera*. Guatemala.
100. Sadzawka, A., Carrasco, M., Grez, R., & Mora, M. (2005). Métodos de análisis de compost. *Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación La Platina, Santiago, de Chile*.

101. Sánchez, F. (2011). Hidrología superficial y subterránea. *Departamento de Geología, Universidad de Salamanca*.
102. Schat, H., Llugany, M., & Bernhard, R. (2000). Metal-specific patterns of tolerance, uptake and transport of heavy metals in hyperaccumulating and nonhyperaccumulating metallophytes. *Phytoremediation of contaminated soil and water*, 171-200.
103. Scheuhammer, A., Meyer, M., Sandheinrich, M., & Murray, M. (2007). Effects of environmental methylmercury on the health of wild birds, mammals and fish. *Ambio*, 12-18.
104. Skinner, J. (2002). Comunicación Personal. *Sololá*.
105. Soto, V. (2017). Validación del método de cuantificación de mercurio en orina por espectrometría de absorción atómica con celdas de vapor frío (FIAS) en el Laboratorio del Departamento de Toxicología. *Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala*.
106. Srivastava, S., Mirshra, S., Dwivedi, S., & Tripathi, R. (2010). Role of Thiol Metabolism in Arsenic Detoxification in *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle. *Water air soil pollut* 212, 155-165.
107. Srivastava, S., Mishra, S., Tripathi, R., Dwivedi, P., & Tandon, P. (2007). Phytochelatins and antioxidant systems respond differentially during arsenite and arsenate stress in *hydrilla verticillata* (L.f.) Royle. *Environ. Sci. Technol* 41, 2930-2936.
108. Staff, S. S. (2010). Keys to Soil Taxonomy. *Natural Resources Conservation Service*, 333.
109. Sylvia, D., Fuhrmann, J., Hartel, P., & Zuberer, D. (1998). Principles and application of soil microbiology. *Technische Universitat damstadt*.
110. TCA. (2004). *Tribunal Centroamerica*. Obtenido de Guatemala - infestación de la planta herbácea *Hidrilla verticillata* en el lago de Izabal.: [http://tragua.com/wp-content/uploads/2012/04/caso\\_lago\\_izabal.pdf](http://tragua.com/wp-content/uploads/2012/04/caso_lago_izabal.pdf)
111. TCA. (2004). *Tribunal Centroamericano de Agua*. Obtenido de Guatemala: infestación de la planta herbácea *hydrilla verticillata* en el laogo de izabal: [http://tragua.com/wp-content/uploads/2012/04/caso\\_lago\\_izabal.pdf](http://tragua.com/wp-content/uploads/2012/04/caso_lago_izabal.pdf)

112. Tiwari, S., Dixit, S., & Verma, N. (2007). An effective means of biofiltration of heavy metal contaminated water bodies using aquatic weed *Eichhornia crassipes*. . *Environ Monit Assess*.
113. Tripathi, R., Rai, U., Gupta, M., & Chandra, P. (1996). Induction of Phytochelatins in *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle under cadmium stress. *Environmental contamination and toxicology* 56, 505-512.
114. Tsai, S. L., S. Singh, and W. Chen. 2009. Arsenic metabolism by microbes in nature and the impact on arsenic remediation. *Curr Opin. Biotechnol.* 20; 659-667
114. Tzanches, W. (2004). Folleto sobre diversidad biológica del país y la amenaza de las especies exóticas. *Guatemala: Oficina Técnica de Biodiversidad -OTECBIO- Consejo Nacional de Áreas Protegidas -CONAP-*.
115. UNEP. (2013). Global Mercury Assment 2013: Sources emissions, releases and environmental transport. *Geneva Switzerland*.
116. USDA. (2010). Claves para la taxonomía del suelo. *Departamento de agricultura de los Estados Unidos*, 365.
117. Uthus, E. (1994). Arsenic essentiality and factors affecting its importance. *Science and Technology Letters*, 199-208.
118. Valenzuela, C., V. L. Campos, J., Yañez, C. A. Zarror, & M. A. Mondaca. 2009. Isolation of arsenite-oxidizing bacteria from arsenic-enriched sediments from camarones River, Northern Chile. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 82; 593-596.
119. Valiente, P. (2008). Determinación cuantitativa de arsénico total en arroz comercializado en la ciudad de Guatemala por espectrofotometría de absorción (HG-AAS). *Escuela de Química Farmacéutica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala*.
119. Yang, X., Long, X., Ye, H., He, Z., Calvert, D., & Stoffella, P. (2004). Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn-hyperaccumulating plant species. *Plant and soil*, 181-189.
120. Zhu, Y., Zayed, A., Quian, J., De Souza, M., & Terry, N. (1999). Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: II Water hyacinth. *J Environ Qual*.

## 14. ANEXOS

### Anexo 1. Resultados de laboratorio de ECOQUIMISA para la muestra MO-E



**ECOQUIMISA**  
LABORATORIO ECOLÓGICO Y QUÍMICO

9ª. Avenida 3-08 zona 2 Colonia Alvarado, Mixco, Guatemala  
E-mail: [informacion@ecoquimisa.com.gt](mailto:informacion@ecoquimisa.com.gt)  
Página Web: [ecoquimisa.com](http://ecoquimisa.com)  
PBX: (502) 2322 3600

### INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS

**Datos del Cliente**

Cliente: Área Compost  
Responsable: Srita. Alejandra Diaz  
Dirección: Aldea Tzakaqajaj, San Pedro La Laguna, Sololá

**Datos de la muestra**

Lugar de muestreo: Aldea Tzakaqajaj      Muestra simple o compuesta: Compuesta  
Referencia cliente: MO-E      Responsable del muestreo: CLIENTE  
Fecha de monitoreo: 07 de junio de 2020      Temperatura de almacenaje: 5 °C  
Hora de monitoreo: 11:00      Recipiente utilizado: Plástico  
Tipo de muestra: Lodos  
Código de muestra: 20-1889-4  
Lote: 20-1889

**Datos de Laboratorio**

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio: 08 de junio de 2020  
Hora de recepción de la muestra por el laboratorio: 10:00  
Fecha de informe: 23 de junio de 2020

Análisis	Dimensional <sup>(1)</sup>	Límite de Detección	Resultados
Arsénico	mg/Kg - As	0.0029	0.918
Cadmio	mg/Kg - Cd	0.009	0.892
Cromo	mg/Kg - Cr	0.362	6.62
Mercurio	mg/Kg - Hg	0.0008	0.047
Pomo	mg/Kg - Pb	0.076	8.99

(1) mg/Kg = ppm.

**Metodología utilizada:** Preparación de la muestra, EPA 3050B y EPA 7471B; análisis de la muestra, PRO53 - LAB.  
Los presentes resultados son válidos únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.  
Se prohíbe la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización de ECOQUIMISA.



Laboratorio ECOQUIMISA  
Lic. Edgar del Pozo

Fuente: Análisis en Laboratorio ECOQUIMISA. informe emitido el 23 de junio de 2020 con código de muestras de la 20-1889-1 a la 20-1889-6.

## Anexo 2. Resultados de laboratorio de ECOQUIMISA para la muestra MO-F



9ª. Avenida 3-08 zona 2 Colonia Alvarado, Mixco, Guatemala  
E-mail: informacion@ecoquimisa.com.gt  
Página Web: ecoquimisa.com  
PBX: (502) 2322 3600

### INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS

#### Datos del Cliente

Cliente: Área Compost  
Responsable: Srta. Alejandra Díaz  
Dirección: Aldea Tzakaqajal, San Pedro La Laguna, Sololá

#### Datos de la muestra

Lugar de muestreo: Aldea Tzakaqajal  
Referencia cliente: MO-F  
Fecha de monitoreo: 07 de junio de 2020  
Hora de monitoreo: 11:00  
Tipo de muestra: Lodos  
Código de muestra: 20-1889-3  
Lote: 20-1889

Muestra simple o compuesta: Compuesta  
Responsable del muestreo: CLIENTE  
Temperatura de almacenaje: 5 °C  
Recipiente utilizado: Plástico

#### Datos de Laboratorio

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio: 08 de junio de 2020  
Hora de recepción de la muestra por el laboratorio: 10:00  
Fecha de informe: 23 de junio de 2020

Análisis	Dimensional <sup>(1)</sup>	Límite de Detección	Resultados
Arsénico	mg/Kg - As	0.009	0.723
Cadmio	mg/Kg - Cd	0.009	0.590
Cromo	mg/Kg - Cr	0.362	6.76
Mercurio	mg/Kg - Hg	0.006	0.011
Plomo	mg/Kg - Pb	0.076	7.40

(1) mg/Kg = ppm.

Metodología utilizada: Preparación de la muestra, EPA 3050B y EPA 7471B; análisis de la muestra, PRO53 - LAB.

Los presentes resultados son válidos únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.

Se prohíbe la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización de ECOQUIMISA.

  
Laboratorio ECOQUIMISA  
Lic. Edgar del Pozo

Fuente: Análisis en Laboratorio ECOQUIMISA. informe emitido el 23 de junio de 2020 con código de muestras de la 20-1889-1 a la 20-1889-6.

## Anexo 3. Resultados de laboratorio de ECOQUIMISA para la muestra LC-E



9ª. Avenida 3-08 zona 2 Colonia Avarado, Mixco, Guatemala  
E-mail: informacion@ecoquimsa.com.gt  
Página Web: ecoquimsa.com  
PBX: (502) 2322 3800

### INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS

#### Datos del Cliente

Cliente: Área Compost  
Responsable: Srita. Alejandra Díaz  
Dirección: Aldea Tzakaqajal, San Pedro La Laguna, Sololá

#### Datos de la muestra

Lugar de muestreo: Aldea Tzakaqajal Muestra simple o compuesta: Compuesta  
Referencia cliente: LC-E Responsable del muestreo: CLIENTE  
Fecha de monitoreo: 07 de junio de 2020 Temperatura de almacenaje: 5 °C  
Hora de monitoreo: 11:00 Recipiente utilizado: Plástico  
Tipo de muestra: Lodos  
Código de muestra: 20-1889-2  
Lote: 20-1889

#### Datos de Laboratorio

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio: 08 de junio de 2020  
Hora de recepción de la muestra por el laboratorio: 10:00  
Fecha de informe: 23 de junio de 2020

Análisis	Dimensional <sup>(1)</sup>	Límite de Detección	Resultados
Arsénico	mg/Kg - As	0.009	0.749
Cadmio	mg/Kg - Cd	0.009	0.962
Cromo	mg/Kg - Cr	0.362	5.48
Mercurio	mg/Kg - Hg	0.006	0.060
Plomo	mg/Kg - Pb	0.076	20.54

(1) mg/Kg = ppm.

Metodología utilizada: Preparación de la muestra, EPA 3050B y EPA 7471B; análisis de la muestra, PRO63 - LAB.

Los presentes resultados son válidos únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.

Se prohíbe la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización de ECOQUIMISA.

  
Laboratorio ECOQUIMISA  
Lic. Edgar del Pozo  
Químico

Fuente: Análisis en Laboratorio ECOQUIMISA. informe emitido el 23 de junio de 2020 con código de muestras de la 20-1889-1 a la 20-1889-6.

## Anexo 4. Resultados de laboratorio de ECOQUIMISA para la muestra LC-F



9ª. Avenida 3-08 zona 2 Colonia Aharado, Mixco, Guatemala  
E-mail: [informacion@ecoquimsa.com.gt](mailto:informacion@ecoquimsa.com.gt)  
Página Web: [ecoquimsa.com](http://ecoquimsa.com)  
PBX: [502] 2322 3500

### INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS

#### Datos del Cliente

Cliente: Área Compost  
Responsable: Srta. Alejandra Díaz  
Dirección: Aldea Tzakaqajaj, San Pedro La Laguna, Sololá

#### Datos de la muestra

Lugar de muestreo: Aldea Tzakaqajaj Muestra simple o compuesta: Compuesta  
Referencia cliente: LC-F Responsable del muestreo: CUENTE  
Fecha de monitoreo: 07 de junio de 2020 Temperatura de almacenaje: 5 °C  
Hora de monitoreo: 11:00 Recipiente utilizado: Plástico  
Tipo de muestra: Lodos  
Código de muestra: 20-1889-1  
Lote: 20-1889

#### Datos de Laboratorio

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio: 08 de junio de 2020  
Hora de recepción de la muestra por el laboratorio: 10:00  
Fecha de informe: 23 de junio de 2020

Análisis	Dimensional <sup>(1)</sup>	Límite de Detección	Resultados
Arsénico	mg/Kg - As	0.0009	0.995
Cadmio	mg/Kg - Cd	0.009	0.996
Cromo	mg/Kg - Cr	0.362	4.73
Mercurio	mg/Kg - Hg	0.0006	0.045
Pomo	mg/Kg - Pb	0.076	9.36

(1) mg/Kg = ppm.

Metodología utilizada: Preparación de la muestra, EPA 3050B y EPA 7471B; análisis de la muestra, PRO53 - LAB.  
Los presentes resultados son válidos únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.  
Se prohíbe la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización de ECOQUIMISA.

Laboratorio ECOQUIMISA

Lic. Edgar del Pozo  
Químico  
C. 10110, 4107

16

Fuente: Análisis en Laboratorio ECOQUIMISA. informe emitido el 23 de junio de 2020 con código de muestras de la 20-1889-1 a la 20-1889-6.

## Anexo 5. Resultados de laboratorio de ECOQUIMISA para la muestra MM-E



9ª. Avenida 3-08 zona 2 Colonia Alverado, Mixco, Guatemala  
E-mail: informacion@ecoquimisa.com.gt  
Página Web: ecoquimisa.com  
PBX: (502) 2322 3600

### INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS

#### Datos del Cliente

Cliente: Área Compost  
Responsable: Srita. Alejandra Diaz  
Dirección: Aldea Tzakaqajal, San Pedro La Laguna, Sololá

#### Datos de la muestra

Lugar de muestreo: Aldea Tzakaqajal Muestra simple o compuesta: Compuesta  
Referencia cliente: MM-E Responsable del muestreo: CLIENTE  
Fecha de monitoreo: 07 de junio de 2020 Temperatura de almacenaje: 5 °C  
Hora de monitoreo: 11:00 Recipiente utilizado: Plástico  
Tipo de muestra: Lodos  
Código de muestra: 20-1889-6  
Lote: 20-1889

#### Datos de Laboratorio

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio: 08 de junio de 2020  
Hora de recepción de la muestra por el laboratorio: 10:00  
Fecha de informe: 23 de junio de 2020

Análisis	Dimensional <sup>(1)</sup>	Límite de Detección	Resultados
Arsénico	mg/Kg - As	0.0009	0.816
Cadmio	mg/Kg - Cd	0.009	1.09
Cromo	mg/Kg - Cr	0.362	5.06
Mercurio	mg/Kg - Hg	0.0006	< 0.0006
Plobo	mg/Kg - Pb	0.076	6.70

(1) mg/Kg = ppm.

**Metodología utilizada:** Preparación de la muestra, EPA 3050B y EPA 7471B; análisis de la muestra, PRO53 - LAB.  
Los presentes resultados son válidos únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.  
Se prohíbe la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización de ECOQUIMISA.

Laboratorio ECOQUIMISA  
C. Estrada del Palen

Fuente: Análisis en Laboratorio ECOQUIMISA. informe emitido el 23 de junio de 2020 con código de muestras de la 20-1889-1 a la 20-1889-6.

## Anexo 6. Resultados de laboratorio de ECOQUIMISA para la muestra MM-F



9ª. Avenida 3-08 zona 2 Colonia Avarado, Mixco, Guatemala  
E-mail: [informacion@ecoquimisa.com.gt](mailto:informacion@ecoquimisa.com.gt)  
Página Web: [ecoquimisa.com](http://ecoquimisa.com)  
PBX: (502) 2322 3600

### INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS

#### Datos del Cliente

Cliente: Área Compost  
Responsable: Srita. Alejandra Díaz  
Dirección: Aldea Tzakaqajaj, San Pedro La Laguna, Sololá

#### Datos de la muestra

Lugar de muestreo: Aldea Tzakaqajaj Muestra simple o compuesta: Compuesta  
Referencia cliente: MM-F Responsable del muestreo: CLIENTE  
Fecha de monitoreo: 07 de junio de 2020 Temperatura de almacenaje: 5 °C  
Hora de monitoreo: 11:00 Recipiente utilizado: Plástico  
Tipo de muestra: Lodos  
Código de muestra: 20-1889-5  
Lote: 20-1889

#### Datos de Laboratorio

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio: 08 de junio de 2020  
Hora de recepción de la muestra por el laboratorio: 10:00  
Fecha de informe: 23 de junio de 2020

Análisis	Dimensional <sup>(1)</sup>	Límite de Detección	Resultados
Arsénico	mg/Kg - As	0.0009	0.797
Cadmio	mg/Kg - Cd	0.009	0.656
Cromo	mg/Kg - Cr	0.362	4.75
Mercurio	mg/Kg - Hg	0.0006	0.0006
Plomo	mg/Kg - Pb	0.076	6.54

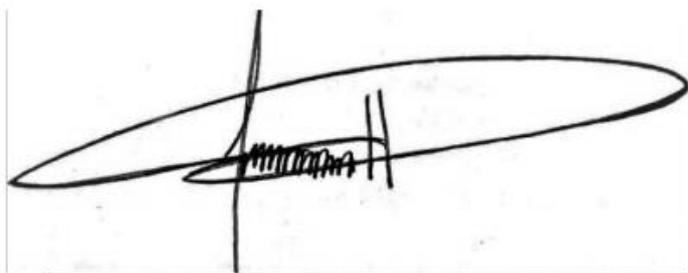
(1) mg/Kg = ppm.

**Metodología utilizada:** Preparación de la muestra, EPA 3050B y EPA 7471B; análisis de la muestra, PRO53 - LAB.  
Los presentes resultados son válidos únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.  
Se prohíbe la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización de ECOQUIMISA.

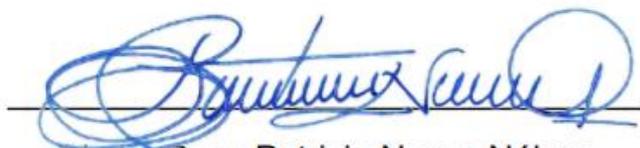
  
Laboratorio ECOQUIMISA  
Dr. Edgar del Pozo  
Químico  
C. Edgar del Pozo

06

Fuente: Análisis en Laboratorio ECOQUIMISA. informe emitido el 23 de junio de 2020 con código de muestras de la 20-1889-1 a la 20-1889-6.



Br. Amparo Alejandra Díaz Hernández



Licda. Rosa Patricia Navas Nájera

Asesora



M.Sc. Bessie Evelyn Oliva Hernández

Directora de Escuela



M.A.. Pablo Ernesto Oliva Soto

Decano