

UNIVERSIDAD NACIONAL

Campus Omar Dengo

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

ESCUELA DE QUÍMICA

**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DE LOS LODOS
PRODUCIDOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
LOS TAJOS Y SU POTENCIAL USO AGRÍCOLA**

**Trabajo sometido a consideración del Tribunal Examinador de la Escuela de
Química, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Química
Industrial**

B.Q. Sergio José Alvarez McInerney

Lic. José Miguel Ramírez Corrales, Tutor

MSc. Ilena Vega Guzmán, Asesora

Ing. German Zarate Montero, Asesor

Heredia

Julio, 2022

"Este trabajo de graduación fue _____ por el Tribunal Examinador de la Escuela de Química de la Universidad Nacional, como requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Química Industrial"

Miembros del Tribunal Examinador del Trabajo Final de Graduación:

	<u>NOMBRE</u>	<u>FIRMA</u>
Decana (o)	_____	_____
Director (a) de la Escuela	_____	_____
Tutor	_____	_____
Asesor	_____	_____
Asesor	_____	_____
Lector	_____	_____
Proponente	_____	_____

RESUMEN

Actualmente, la mejora de la calidad de aguas de los ríos de zonas urbanas como el GAM de San José es un objetivo del Gobierno de Costa Rica. El Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados es el líder institucional en saneamiento y depuración de aguas vertidas, el cual dirige y promueve el Proyecto de Mejoramiento del Ambiente del Gran Área Metropolitana de San José, ampliando su red de colectores aproximadamente en 200 km de tuberías con el fin de recoger todas las aguas residuales que requieran tratamiento antes de ser vertidas en un cuerpo de receptor.

Para realizar este procedimiento, AyA cuenta con la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos, que recibe las aguas captadas por las tuberías y colectores y les brinda tratamiento. De esta manera se obtienen aguas con concentraciones menores de contaminantes y agentes patológicos que serán vertidas nuevamente al cuerpo receptor.

Como resultado de este proceso de depuración se obtienen los lodos residuales, los cuales están compuestos en su mayor parte por material orgánico proveniente de las excretas humanas y residuos domésticos.

El objetivo de este proyecto es evaluar la composición química y microbiológica de los lodos producidos en el proceso de depuración de las aguas residuales en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos, para su valoración como insumo para el sector agrícola. Para el cumplimiento de este objetivo se realizaron pruebas fisicoquímicas, microbiológicas y fitotoxicológicas que contemplaron el análisis de metales por ICP-MS, sodio y potasio por fotometría de llama, nitrógeno total Kjeldahl y fósforo total por espectrofotometría de UV/Visible, pH, humedad total, materia orgánica total. Se realiza el conteo de coliformes fecales totales y huevecillos viable de helmintos y por último, se analiza la toxicidad mediante pruebas de crecimiento y germinación.

El análisis de estos lodos muestra la presencia de metales pesados como cromo, níquel y plomo en bajas concentraciones de 0.60, 0.80 y 2.50 mg/kg, respectivamente, lo cual no representa un riesgo en su futuro uso como potenciador de suelos, ya que se encuentran dentro de los parámetros presentados por el Reglamento 485:2016 del Ministerio de Agricultura y Ganadería, sobre Fertilizantes y enmiendas agrícolas. Con respecto a las variables fisicoquímicas de los lodos, se determinó que el porcentaje de humedad promedio fue de 70.25% y el pH promedio fue de 6.95 para un total de 11 muestras analizadas en este estudio. La concentración de macro y micronutrientes como Na (14.90 mg/g concentración promedio), K (5.17 mg/g concentración promedio), P (1.89 mg/g concentración promedio), y N (17.00 mg/g concentración promedio), se encuentran en los niveles óptimos presentados por el Reglamento 485:2016 del Ministerio de Agricultura y Ganadería, sobre Fertilizantes y enmiendas agrícolas.

Los análisis microbiológicos determinaron la presencia de coliformes fecales por encima del valor establecido en el Reglamento N° 39316-S, Manejo y disposición final de lodos y biosólidos para biosólidos tipo A y en el límite para biosólidos tipo B, teniendo un máximo

en los conteos de 2×10^6 UFC/g y la presencia de 18 huevecillos viables/g de huevecillos de helmintos, encontrándose el 27.27% de las muestras por encima de los límites máximos permitidos por el Reglamento N° 39316-S.

De esta manera se concluye que los lodos producidos por la PTAR Los Tajos tienen un alto potencial como enmienda agrícola, ya que sus características fisicoquímicas se encuentran dentro de los parámetros establecidos por el Reglamento N° 39316-S, Manejo y disposición final de lodos y biosólidos y el Reglamento 485:2016 del Ministerio de Agricultura y Ganadería, sobre Fertilizantes y enmiendas agrícolas. Sin embargo, para cumplir con las características microbiológicas los biosólidos requieren se les realice un tratamiento posterior a la digestión anaerobia y deshidratación como el compostaje, tratamientos químicos o radiación, ya que es necesario garantizar la inocuidad de estos para su posterior uso.

DEDICATORIA

Deseo dedicar este proyecto de graduación a mi papá y a mi mamá, Sergio Alvarez Villalón y Marisol McInerney Davis, quienes, con su apoyo y constante guía, me ayudaron a nunca rendirme, a valorar las cosas sean buenas como malas que nos encontramos en el camino. Por enseñarme que con esfuerzo y dedicación se pueden lograr grandes cosas y a ser mi fuente de inspiración todos los días.

“Somos visitantes en este planeta. Estamos aquí por cien años a lo sumo. Durante ese periodo hay que tratar de hacer algo bueno, algo útil con nuestras vidas.” Dalai Lama

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecerle al Lic. José Miguel Ramírez por haberme apoyado en el desarrollo de este proyecto y su gran influencia como persona y como profesional.

A la MSc. Ilena Vega Guzmán, quien, con su constante apoyo, amistad e insistencia, me guió en cada paso del desarrollo de este proyecto y no me dejó rendirme.

A mi amigo de años y de miles de conversaciones, el Ing. Germán Zarate Montero, por sus observaciones y aportes para que este trabajo finalmente vea la luz. Muchas gracias “Mens”.

A mi compañera en el Laboratorio Nacional de Aguas, Licda. Betzabel Arias Barrantes por haberme ayudado con el análisis de las muestras y por su amplio conocimiento en la técnica de ICP-MS.

A mi amigo y colega, Lic. Ernesto Alfaro Arrieta, quien, con su gran experiencia en el campo de la biotecnología y la microbiología de aguas residuales, me enseñó, compartió su conocimiento conmigo y me ayudó en el análisis microbiológico de los lodos.

A mis colegas Carlos y Andrés, “Charlie” y “Chaloy” por su gran colaboración en la recolección y manejo de las muestras y por todos esos ratos divertidos y de aprendizaje en el laboratorio.

A mis amigos, quienes posiblemente lean este documento y no lo entiendan, muchas gracias. Sin ustedes, hace años lo hubiera terminado pero su amistad es invaluable.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecerme a mí mismo, por haber mantenido la frente en alto todos estos años, por nunca haberme rendido, por querer ser cada vez mejor, aunque el panorama sea oscuro y las cosas difíciles.

INDICE GENERAL

	Página
RESUMEN	i
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE CUADROS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xii
LISTA DE ABREVIACIONES Y SÍMBOLOS	xiii

Contenido

1. Capítulo I. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Marco Teórico.....	2
1.2.1 El agua residual y su composición.....	2
1.2.2 Fuentes generadoras de aguas residuales.....	3
1.2.3 Lodos provenientes del tratamiento de las aguas residuales.....	3
1.2.4 Proyecto de “Mejoramiento del ambiente del Gran Área Metropolitana de San José”	4
1.2.5 La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos.....	5
1.2.5.1. Características de la planta de tratamiento.....	6
1.2.5.1.1 Línea de aguas.....	6
1.2.5.1.2 Tratamiento primario.....	7
1.2.5.1.3 Línea de gases.....	7
1.2.5.1.4 Procesamiento de lodos.....	8
Figura 1. Imagen representativa de la línea de lodos hasta su llegada al depósito tampón. Fuente: PTAR Los Tajos (2017).....	9
1.2.6 Regulación Nacional: Reglamento N° 39316-S para el manejo y disposición final de lodos y biosólidos.....	9

1.2.6.1	Reglamentos internacionales. Casos latinoamericanos.....	12
1.2.6.1.1	México.....	13
1.2.6.1.2	Colombia.....	13
1.2.6.1.3	Chile.....	13
1.2.6.1.4	Argentina.....	14
1.2.6.2	Límites máximos permitidos en los Reglamentos internacionales. Casos de Latinoamérica.....	14
2.	Capítulo II. Objetivos.....	15
2.1.	Objetivo general.....	15
2.2.	Objetivos específicos.....	15
3.	Capítulo III. Metodología.....	16
3.1.	Sección experimental.....	16
3.1.1	Ubicación del punto de muestreo.....	16
3.1.2	Sistema de muestreo.....	16
3.1.3	Muestreo.....	17
3.1.4	Análisis y preparación de las muestras.....	17
3.1.4.1.	Digestión de las muestras de lodos.....	18
3.1.4.2.	Determinación de metales por la técnica de ICP-MS.....	18
3.1.4.2.1.	Determinación de las curvas de calibración para una variedad de metales analizados por la técnica de Plasma de Acoplamiento Inducido con detector de masas (ICP-MS). 19	19
3.1.4.3.	Determinación de Nitrógeno Total Kjeldahl.....	21
3.1.4.4.	Determinación de sodio y potasio.....	22
3.1.4.5.	Determinación de Fósforo Total.....	22
3.1.4.6.	Determinación de pH.....	23
3.1.4.7.	Determinación del porcentaje de humedad total.....	23
3.1.4.8.	Determinación de Material Orgánico Total.....	24
3.1.4.9.	Determinación de coliformes fecales totales.....	24
3.1.4.10.	Determinación de huevecillos de helmintos.....	25
3.1.4.11.	Pruebas de crecimiento vegetal controlado.....	25
4.	Capítulo IV. Resultados y discusión.....	27
4.1.	Resultados de los análisis de las muestras de lodos de la PTAR Los Tajos.....	27
4.1.1	Cuantificación de metales por ICP-MS.....	27
4.1.2	Análisis fisicoquímico de las muestras.....	30

4.1.3	Determinación de variables microbiológicas	35
4.1.4	Determinación de toxicidad por crecimiento controlado.....	38
5.	Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones.	41
6.	Capítulo VI. Referencias bibliográficas.	43

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Límites permisibles para los parámetros de análisis obligatorio de los biosólidos de tipo ordinario, según disposición final.....	11
Cuadro 2. Límites máximos permisibles para los parámetros de análisis obligatorio de biosólidos de tipo especial para su disposición final.....	12
Cuadro 3. Límites máximos permitidos de metales pesados en los reglamentos de tratamiento, uso y disposición de lodos de diferentes países latinoamericanos y Norteamérica y la situación en Costa Rica	14
Cuadro 4. Preparación de patrones para curvas de calibración de metales en ICP-MS.....	20
Cuadro 5. Concentración de metales pesados analizados en matriz líquida de la digestión y analizados en ICP-MS en lodos de la PTAR Los Tajos expresados como miligramo de metal presente por kilogramo de muestra.....	29
Cuadro 6. Análisis de humedad y material orgánico en las muestras de lodos de la PTAR Los Tajos.....	30
Cuadro 7. Macro y micronutrientes determinados en los lodos de la PTAR Los Tajos.....	33
Cuadro 8. Conteo de germinación para cada contenedor de pruebas de crecimiento y toxicidad.....	39

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Diagrama de flujo para línea de lodos.....	9
Figura 2. Diagrama de flujo de la línea de deshidratación de lodos y localización fotográfica del punto de muestreo en el tornillo sin fin.....	16
Figura 3. Digestor de microondas con sistema de centrifuga Berhoff Speedwave Xpert.....	18
Figura 4. Acoplador de plasma inductivo con detector de masas para el análisis de muestras de metales.....	19
Figura 5. Fotómetro de llama Perkin Elmer modelo 2655-10 Dual Channel Flame Photometer.....	22

ÍNDICE DE ANEXOS

	Página
Anexo 1. Curvas de calibración de mezcla de metales en ICP-MS.....	50
Anexo 1.1. Curva de calibración para aluminio.....	50
Anexo 1.2. Curva de calibración para cromo.....	50
Anexo 1.3. Curva de calibración para manganeso.....	51
Anexo 1.4. Curva de calibración para hierro.....	51
Anexo 1.5. Curva de calibración para níquel.....	52
Anexo 1.6. Curva de calibración para cobre.....	52
Anexo 1.7. Curva de calibración para zinc.....	53
Anexo 1.8. Curva de calibración para arsénico.....	53
Anexo 1.9. Curva de calibración para selenio.....	54
Anexo 1.10. Curva de calibración para cadmio.....	54
Anexo 1.11. Curva de calibración para antimonio.....	55
Anexo 1.12. Curva de calibración para mercurio.....	55
Anexo 1.13. Curva de calibración para plomo.....	56
Anexo 2. Pruebas de crecimientos vegetal y toxicidad.....	57
Anexo 2.1. Secuencia de fotografías registro del crecimiento de la muestra vegetal.....	57
Anexo 3 Microfotografías de la determinación de huevecillos de helmintos.....	60
Anexo 3.1. Ascaris lumbricoides.....	60
Anexo 3.2. Trichiuris Trichiura.....	60
Anexo 3.3. Uncinaria.....	61

Anexo 4. Concentración de metales totales analizados por el método de ICP-MS en lodos obtenidos en la PTAR Los Tajos.....	62
Anexo 5. Resultado de análisis de humedad total en las muestras de lodos de la PTAR Los Tajos.....	67
Anexo 6. Resultado de análisis de pH en las muestras de lodos de la PTAR Los Tajos.....	68

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Página
Gráfico 1. Determinación de pH en muestras de lodos.....	31
Gráfico 2. Gráfico de conteo total de huevecillos de helmintos en las muestras de lodos.....	36
Gráfico 3. Recuento total de coliformes fecales en las muestras de lodos de la PTAR Los Tajos.....	37
Gráfico 4. Conteo de germinación de semillas de <i>Raphanus sativus</i> para la determinación de la toxicidad de los lodos de la PTAR Los Tajos.....	38

LISTADO DE ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

°C: Grado Celsius

AyA: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados

DBO₅: Demanda Biológica de Oxígeno

ECA: Ente Costarricense de Acreditación

EPA: Environmental Protection Agency

GAM: Gran Área Metropolitana

ICP-MS: Acoplador de Plasma Inducido con Detector de Masas

JBIC: Banco Japonés para la Colaboración Internacional

kcal/h: Kilocalorías por hora

km: Kilometro

LNA: Laboratorio Nacional de Aguas

LLD: Los Tajos Lodos Deshidratados

M: Molar

mg: Miligramos

mL: Mililitro

mm: Milímetros

N°: Número

NA: No aplica

pH: Potencial de hidrógeno

ppm: Partes por millón

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

RPM: Revoluciones por minuto

RTCR: Reglamento Técnico de Costa Rica

S.A.: Sociedad Anónima

SST: Sólidos Suspendidos Totales

UFC: Unidades Formadoras de Colonias

1. Capítulo I. Introducción.

1.1. Antecedentes.

Costa Rica ha sido conocida por mucho tiempo como un país comprometido con el manejo de los recursos ecológicos y la defensa del medio ambiente. Sin embargo, la mala planificación por parte del gobierno central y municipios ha causado un aumento importante en el grado de contaminación de ríos y fuentes de agua, producto de las malas regulaciones en materia ambiental que rigen sobre el manejo de residuos domésticos, agrícolas e industriales (Herrera, 2017).

En vista de esta problemática, instituciones responsables del tratamiento y saneamiento del agua como lo es el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) propulsaron en el año 2006 el proyecto de “Mejoramiento del Ambiente del Gran Área Metropolitana de San José”. Este proyecto fue aprobado por la ley 8559 del viernes 24 de noviembre del 2006, con la recepción de un préstamo externo suscrito por el gobierno de la República de Costa Rica y el Banco Japonés para la Colaboración Internacional (JBIC) (AyA, 2009).

El proyecto de “Mejoramiento del Ambiente del Gran Área metropolitana de San José” tiene como objetivo reparar la red de alcantarillado sanitario existente y la colocación de nuevas tuberías de alcantarillado sanitario en zonas en donde no hay cobertura, el cual dirige los residuos hasta una nueva planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) llamada PTAR Los Tajos.

La construcción de la PTAR Los Tajos inicio en noviembre del año 2012 como parte de este proyecto ambiental. La compañía española Acciona Agua S.A. estuvo a cargo de la dirección y construcción de esta planta, la cual duró 3 años en concluir la construcción de la primera etapa. Se inauguro en setiembre del 2015, y se ubica en la Uruca, San José, Costa Rica, diagonal a las instalaciones de SINART sobre la entrada principal del centro urbano La Carpio (FuturEnviro, 2015).

La PTAR Los Tajos recibe las aguas residuales captadas de los 11 principales cantones de San José y el sistema de captación recorre un aproximado de 200 km de tuberías para su debido tratamiento. Al encontrarse actualmente en su primera etapa, la planta realiza un tratamiento primario, principalmente físico en el cual se remueven materiales y contaminantes del agua, principalmente aquellos de origen orgánico como grasas, aceites y material fecal. Al realizar esta serie de procesos se generan materiales de desecho en forma de lodos, los cuales por su naturaleza cuentan con altos contenidos de material orgánico (Ruiz, 2012).

El manejo y disposición final de los lodos generados en este sistema de tratamiento es de los retos más importantes que afronta la PTAR Los Tajos y la institución, ya que, al tratarse de lodos residuales domésticos, se encuentran bajo el marco de control del Reglamento para el

manejo y disposición final de lodos y biosólidos (Decreto Ejecutivo 39316-S del 2 de diciembre del 2015), para su cumplimiento, la PTAR implementa procesos de tamizaje, espesado y digestión anaerobia, sin embargo su disposición final tiene un costo económico alto, ya que se contrata el servicio de recolección y disposición final a relleno sanitario (Poder Ejecutivo, 2015).

Una de las características de los lodos de tipo ordinario resultantes del proceso primario de depuración de aguas residuales que se efectúa en la PTAR Los Tajos, es un alto porcentaje de material orgánico, lo que con un adecuado manejo permitiría la utilización de este material como un potenciador de suelos para uso agrícola, evidentemente luego de realizar el estudio adecuado de factores físicos, químicos y microbiológicos solicitados en el Reglamento antes mencionado y siendo complementado el estudio con la determinación de parámetros establecidos en normas internacionales.

Esta investigación pretende caracterizar los lodos de la PTAR Los Tajos para generar una línea base que permita evaluar futuras opciones de aprovechamiento de lodos como biosólidos para su uso en suelos contribuyendo a disminuir el uso de abonos químicos en el tratamiento de suelos, mejorando las características agronómicas de los campos de siembra, el ambiente a su alrededor, cuerpos de agua y mejoraría la calidad del producto al ser un insumo orgánico (Valderrama, 2013).

1.2. Marco Teórico.

1.2.1 El agua residual y su composición

El agua es la sustancia más utilizada tanto en la industria como en la vida diaria por el ser humano. Una vez que esta es utilizada en diferentes procesos ya sean industriales, comerciales o domésticos, se considera que sus características han sido modificadas. Así, las aguas residuales se definen como cualquier tipo de agua que, al haber sido utilizadas en actividades productivas o domésticas, se vio afectada en sus características de una forma negativa y requieren de un tratamiento para su canalización, purificación y desalojo. Cuando se carece de este tratamiento, las aguas residuales generan graves problemas de contaminación en ríos y acuíferos (WHO, 2006).

Las aguas residuales de origen doméstico, cuya composición es mayoritariamente material orgánico procedente de las excretas humanas, se canalizan por medio de alcantarillado sanitario hacia plantas de tratamiento en las cuales se depuran para ser vertidas nuevamente a un cuerpo de agua.

Cerca del 1% de la composición química de las aguas residuales corresponde a sólidos en suspensión, que se dividen en una fracción coloidal y otra fracción suspendida en el agua y se analizan dentro del grupo de sólidos suspendidos totales (SST). Otra fracción presente es la soluble, que representa todas aquellas sustancias que se encuentran disueltas en el agua pero que de igual manera alteran las características del líquido (WHO, 2006).

Estos sólidos presentes en el agua tienen dos clasificaciones: 1. sólidos inorgánicos y 2. sólidos orgánicos. Dentro de los sólidos inorgánicos podemos encontrar sustancias principalmente formadas por nitrógeno, fósforo, sulfatos, cloruros, carbonatos y metales pesados como arsénico, cadmio, mercurio, plomo y zinc.

Los sólidos orgánicos se separan en nitrogenados y no nitrogenados. Entre los sólidos nitrogenados (aquellos en los que su molécula presenta nitrógeno en su estructura) podemos encontrar proteínas, urea, aminas y aminoácidos. Por otro lado, los sólidos no nitrogenados consisten principalmente de celulosa, grasas, jabones y aceites (Schulz y Römheld, 1997).

Es de gran importancia la remoción de agentes patógenos de las aguas residuales. Estos agentes patógenos son en su mayoría de origen microbiológico y se tratan con el fin de cortar el ciclo epidemiológico de transmisión. Los principales patógenos presentes en aguas residuales de origen doméstico son los coliformes fecales, los virus y bacterias (Houot et al., 2002).

1.2.2 Fuentes generadoras de aguas residuales

Las aguas residuales provienen de diversas fuentes por lo que pueden clasificarse según su origen. De esta manera las podemos clasificar en (WHO, 2006):

1. *Aguas residuales domésticas o aguas negras*: son aquellas aguas que proceden de la contaminación con heces y orina humana, del aseo personal, de la cocina y de la limpieza de la vivienda. En su mayor parte contienen gran cantidad de materia orgánica y microorganismos y se incluyen además jabones, grasas, aceites y lejía.
2. *Aguas blancas*: son aguas provenientes de la atmósfera, del riego y limpieza de calles, parques y demás lugares públicos.
3. *Aguas residuales industriales*: son aguas que se generan de los procesos productivos de fábricas e industria. Contienen alto porcentaje de aceites, detergentes, fármacos, antibióticos, ácidos, grasas y otros productos y subproductos de origen mineral, químico, vegetal o animal. Debido a las diferentes actividades industriales, estas aguas van a ser muy diferentes a las demás ya que por ejemplo contienen los residuos biológicos de la industria de la carne (mataderos) o residuos metálicos de la industria metalúrgica.
4. *Aguas residuales agrícolas*: provienen del riego y utilización en sembradíos que se encuentran en zonas rurales. Contienen sustancias como plaguicidas que resultan en un peligro químico para el ser humano debido a su alta toxicidad.

1.2.3 Lodos provenientes del tratamiento de las aguas residuales

Como resultado del tratamiento primario de las aguas residuales y la remoción del material suspendido en el agua, se obtienen los lodos. Estos lodos están compuestos en su mayor parte por material orgánico proveniente de excretas humanas y residuos domésticos, pero también

pueden presentar residuos de actividades industriales, los cuales se han vertido al sistema de recolección de aguas residuales y dirigidos a la PTAR. (López et al., 2015)

En su proceso de tratamiento en la PTAR, estos lodos se deshidratan para formar una masa densa y sólida, similar a la arcilla la cual requerirá de un proceso posterior de compostaje para poder ser utilizados como abono orgánico o suplemento de siembra. (Ciešlik et al., 2015)

Al tratarse de material orgánico, el compostaje de estos lodos generará un biosólido que en estudios como los realizados por McLaughlin (1984) se demuestra que tiene el potencial de recuperar el suelo y mejorar las condiciones de este para futuras siembras.

Estos biosólidos se caracterizan en ordinarios y especiales. Los biosólidos ordinarios son aquellos que se obtienen de lodos sanitarios y sépticos, o sea aquellos que se han producido en plantas de tratamiento del tipo ordinario y tanques sépticos. Los biosólidos especiales son aquellos que se producen a partir de lodos especiales, provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales de tipo especial y plantas potabilizadoras, debido al uso de químicos como coagulantes, polímeros y floculantes (Poder Ejecutivo, 2015).

Según la forma de disposición final los biosólidos pueden ser subcategorizados en biosólidos clase A que son todos aquellos biosólidos que se dispondrán en localidades cercanas al público y en biosólidos clase B, los cuales serán dispuestos en terrenos donde el público no tiene acceso como los son terrenos agrícolas (Poder Ejecutivo, 2015).

Cabe aclarar, que las aguas residuales que hacen ingreso a la PTAR Los Tajos son de tipo ordinario ya que provienen de domicilios y comercios, y que al final del proceso se obtienen biosólidos de tipo especial debido a que el proceso de tratamiento de deshidratación de los lodos involucra la utilización de un polímero catiónico, por lo que por definición del reglamento a pesar de que su origen es ordinario se considera especial.

1.2.4 Proyecto de “Mejoramiento del ambiente del Gran Área Metropolitana de San José”

El proyecto de mejoramiento ambiental del Gran Área Metropolitana fue aprobado en el año 2006 bajo la ley N° 8559, para la Aprobación del contrato de préstamo externo N° CR-P4, suscrito entre el gobierno de Costa Rica y el Banco Japonés para la Cooperación Internacional (JBIC). Con este préstamo se financió la puesta en marcha del proyecto y las actividades relacionadas a este (AyA, 2009).

El proyecto lleva a cabo obras que contribuirán a la rehabilitación, mantenimiento, refuerzo, reubicación y ampliación de la red de conexiones de tuberías colectoras de aguas residuales de la zona metropolitana de San José, con un aumento cercano a los 200 km de tuberías lo que beneficia a una población de alrededor de 1100000 personas. Además, se aumenta la recolección de aguas residuales, lo que disminuye el vertido ilícito de un 20,1% a un 0,5% en ríos y quebradas (AyA, 2009).

La implementación de esta nueva red de alcantarillado sanitario culmina en la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales, en la que se disponen estas aguas y se les dá tratamiento para luego enviarlas al afluyente del río. Con anterioridad a la creación de esta planta, la gestión y tratamiento de estas aguas era deficiente lo que generaba mucha contaminación principalmente en ríos y lo que era causante de enfermedades en poblaciones cercanas y en riesgo (AyA, 2009).

Este proyecto de mejora ambiental le da muchos beneficios a la población del área más poblada del país. Podemos mencionar que la disminución de vertidos de material orgánico en ríos y quebradas es notoria y esto lleva a una gran mejora en la salud pública, ya que al existir menores factores de riesgo orgánico se disminuyen las plagas y enfermedades relacionadas a la contaminación del agua (AyA, 2009).

Este proyecto contempla la construcción y desarrollo de 28 obras distribuidas en 11 cantones del GAM: San José, Desamparados, Goicoechea, Alajuelita, Vásquez de Coronado, Tibás, Moravia, Montes de Oca, Curridabat, La Unión y Escazú. Algunas de las obras más representativas en el desarrollo de este proyecto se destacan la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos, el túnel de trasvase y el Emisario Metropolitano, el sistema de alcantarillado y de redes colectores de los ríos María Aguilar, Tiribí, Rivera y Torres y el plan de conexiones intradomiciliarias (AyA, 2009).

1.2.5 La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos.

La PTAR Los Tajos es la planta de tratamiento de aguas residuales más grande de Costa Rica y se proyecta que esté al nivel de las plantas de tratamiento de la región centroamericana junto con plantas en Nicaragua, Guatemala y Panamá. Actualmente en su primera etapa, se realiza un tratamiento primario (fisicoquímico) a las aguas residuales que son colectadas en etapas anteriores a su ingreso a la planta y a los lodos generados de este proceso. Esta planta cuenta con un caudal promedio diario de diseño de 2.81 m³/s y máximo diario de 3,45 m³/s de agua que ingresa, resultando en una producción (según diseño) de 44244 kg/d de lodos (FuturEnviro, 2015).

En las primeras etapas de la obra se realizaron los diseños, la construcción, la puesta en marcha y la transferencia tecnológica. Todo esto inicio en el año 2008 y para el año 2015 fue inaugurada con la operación de tratamiento preliminar y primario de las aguas y el sistema completo de tratamiento de lodos.

La planta en su diseño final y en su actual funcionamiento tiene las siguientes unidades de tratamiento:

- Bypass para eventos extremos y excesos de cargas de agua direccionado al río cercano a la planta.
- Receptor de entrada con un dissipador de energía el cual incluye unión para la llegada del Emisario Metropolitano.

- Sistema sifón el cual eleva la carga hidráulica.
- Rejillas gruesas y finas para la retención de materiales.
- Desarenadores-desengrasadores.
- Sedimentadores primarios.
- Desfogue al río.
- Espesador de lodos.
- Biodigestores anaerobios de lodos.
- Deposito Tampón
- Centrifugas con dosificadores de polímero.
- Sistema de almacenaje, transporte y disposición de lodos.
- Sistema de calentamiento de lodos con calderas e intercambiadores de calor.
- Generadores eléctricos para el uso del excedente de biogás producido en los biodigestores.
- Sistema de control de olores.

1.2.5.1. Características de la planta de tratamiento.

1.2.5.1.1 Línea de aguas.

La estructura de entrada y el tratamiento preliminar hasta el desbaste de sólidos finos están ubicados en un único edificio. El caudal de entrada se mide en la entrada del emisario a la planta, mediante un medidor ultrasónico de 1,8 metros de diámetro colocado dentro de la tubería de entrada.

El agua cruda ingresa a la planta en un sistema de pretratamiento, esta se dirige al pozo de gruesos donde disminuye la turbulencia del afluente. Este pozo de gruesos contempla también el bypass, que en caso de emergencia o un aumento extremo del afluente, abrirá sus compuertas, descargando el exceso de agua directamente al río.

El pozo de gruesos permite retener cualquier material voluminoso que ingrese a la planta. Este se extrae con una cuchara bivalva y se deposita en contenedores de desecho. Este pozo tiene un diseño que permite la permanencia (tiempo de retención) mínimo de 69 segundos. Tiene una forma de tronco piramidal invertida en el fondo lo que permite la concentración de desechos voluminosos pesados.

En la salida del pozo de gruesos se encuentran las rejillas de desbaste. Estas se diseñaron en tres etapas: impacto, gruesos y finos. Las rejillas de impacto reciben cualquier material mayor a 100 mm de diámetro. Las rejillas de gruesos y finos son filtros colocados en canales, con una luz de paso de 30 mm para los gruesos y 6 mm para los finos. Un tornillo transportador se encarga de movilizar y retirar el material, el cual será depositado en contenedores al final del trayecto.

En esta etapa se encuentra además el desarenado y desengrasado. El diseño de esta etapa se pensó de tal manera que la estructura pudiera retener la arena y al mismo tiempo hacer flotar las grasas, aceites y pequeños flotantes. Las arenas son eliminadas mediante bombas que se mueven al mismo tiempo que el puente que retira las grasas, y flotantes. Las grasas y aceites antes de ser retiradas por el puente requieren ser emulsionadas, lo cual se realiza por un sistema de inyección de aire en el agua. En el primer tercio del canal se utilizan difusores de aire, en el segundo tercio del canal se aporta el aire mediante aireadores mecánicos y el tercer tercio se reserva para que el flujo de agua adquiera condición laminar (FuturEnviro, 2015).

1.2.5.1.2 Tratamiento primario

Concluido el pretratamiento del agua que ingresa en la planta, esta es recogida y enviada mediante un colector a los sedimentadores primarios que es parte del sistema primario de tratamiento. El sistema de sedimentación primaria es un sistema de sedimentación con aspas lamelares, espesamiento y recirculación de lodos. Está diseñado para ocupar el mínimo espacio posible. Este sistema se diseñó para disminuir la necesidad de adicionar reactivos de sedimentación, aunque si fuera necesario se podrían utilizar invirtiendo en un dosificador que permitiría aumentar la eliminación de sólidos suspendidos y DBO₅, lo que mejoraría la calidad de agua en un posterior tratamiento biológico.

En la parte inferior del sedimentador se encuentra el espesador de raquetas que concentra los lodos sedimentados, los recirculan y el exceso se envía al tratamiento de lodos (FuturEnviro, 2015).

1.2.5.1.3 Línea de gases

La producción de gases es evidente en cada proceso que se da en la planta de tratamiento. Por este motivo la línea de tratamiento de gases es de suma importancia. Existen dos líneas de tratamiento de gases, la que proviene del tratamiento de olores y la que generación de biogás. La digestión anaerobia de los lodos se da en un digestor en forma de cúpula y base troncopiramidal, lo que permite una homogeneización del lodo uniforme mediante lancetas en las que se inyecta el mismo biogás generado para agitación, la parte superior del digestor es lo más reducida posible para disminuir al máximo la superficie de contacto entre el gas y el lodo. Para que la digestión tenga un correcto funcionamiento es importante una buena homogeneización de los lodos que se encuentran en los digestores. Esto se realiza mediante la inyección de gas a través de tuberías mediante el uso de compresores.

El biogás se utiliza en sistemas de cogeneración eléctrica (Morera, 2018). Las calderas producen agua caliente que será utilizada en estos intercambiadores de calor. Estas son alimentadas ya sea por el mismo gas producido durante la digestión o en su defecto por combustible como gasoil o gasolina.

Los gases producidos durante esta etapa sufren de un proceso de ruptura molecular resultando en la producción de metano y dióxido de carbono, así como otros subproductos como lo es el sulfuro de hidrogeno y vapor de agua saturado.

El biogás producido recibe un tratamiento en el cual se elimina la humedad y sustancias no deseadas, entre las que podemos nombrar amoniaco, siloxanos y sulfuro de hidrógeno. La eliminación de estos contaminantes se da en dos procesos, uno grueso y otro fino, los cuales consisten primeramente en el enfriamiento y condensación de la humedad y siloxanos y segundo, la adsorción en carbón activado de sustancias como el sulfuro de hidrógeno. Luego el gas limpio se almacena para su posterior uso.

Además del gas que se produce en los biodigestores, también se generan gases en otras etapas de la planta. Por este motivo existe un sistema de desodorización. Los olores son extraídos mediante una serie de conductos ubicados en cada edificio y superficie cubierta. La desodorización se realiza de manera química y biológica (FuturEnviro, 2015).

1.2.5.1.4 Procesamiento de lodos

En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo del sistema de control del procesamiento de los lodos de la PTAR Los Tajos. El espesamiento de lodos se realiza en el fondo de los sedimentadores, en donde se separan del agua clarificada. Estos sedimentadores tienen equipados sistemas de recolección de espumas y flotantes. De estos sedimentadores se extraen dos tipos de lodos. Los que se recircularán a la cabeza del sedimentador y los lodos primarios que irán al tratamiento posterior. Los lodos primarios son principalmente materiales en suspensión, se extraen y se redirigen a los espesadores.

Previo al proceso de espesamiento, los lodos se someten a un tamizaje para eliminar fibras y materiales que puedan interferir en los procesos posteriores, tanto al espesamiento como a la digestión, y así evitar bloqueos en las tuberías.

El espesamiento primario de los lodos se realiza en un espesador de gravedad el cual concentra los lodos. Una vez espesados, los lodos son almacenados en un tanque y mezclados mediante agitación y luego transportados por un mecanismo de tuberías y bombas hasta los homogeneizadores, de los cuales posteriormente se transportan los lodos homogeneizados a los digestores.

Durante la digestión anaerobia, los lodos sufren una descomposición de un 45% aproximadamente en su material volátil y un tiempo de residencia de 21 días de operación continua, lo que produce el metano y dióxido de carbono de la línea de gases de biogás. El homogeneizado de los lodos en los digestores se realiza inyectando gas a presión a través de tuberías lanza dentro de la estructura.

Después de este paso se almacenan los lodos en un depósito tampón conectado al sistema de olores que funciona como almacenamiento entre el proceso de digestión y la deshidratación.

La purga de este depósito es enviada al sistema de deshidratación de lodos, en el cual antes de su deshidratación se somete a los lodos a un acondicionamiento químico mediante la adición de polielectrolitos catiónicos. Este polímero se prepara antes de la adición al lodo en un tanque de mezclado añadiendo el polímero y agua y dejando madurar, para luego añadirlo según la dosis calculada a la entrada de la centrífuga. La deshidratación se realiza por centrifugado y reduce la humedad del lodo de un 80% a un 25% aproximadamente.

El material deshidratado se transporta hasta los silos de almacenamiento mediante tornillos transportadores (FuturEnviro, 2015).

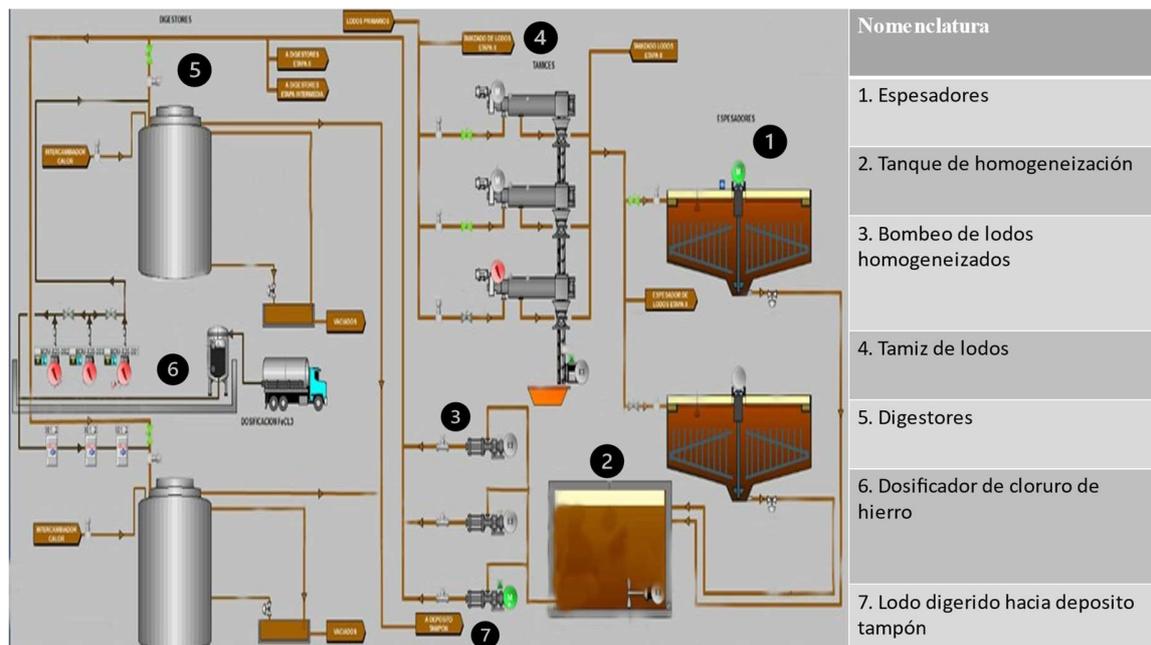


Figura 1. Imagen representativa de la línea de lodos hasta su llegada al depósito tampón. Fuente: PTAR Los Tajos (2017)

1.2.6 Regulación Nacional: Reglamento N° 39316-S para el manejo y disposición final de lodos y biosólidos

El miércoles 2 de diciembre del 2015 se publica en el Diario Oficial La Gaceta el Reglamento N° 39316-S Reglamento para el manejo y disposición final de lodos y biosólidos (Poder Ejecutivo, 2015). Este reglamento regula a nivel nacional, como su nombre lo menciona, el manejo y disposición final de lodos y biosólidos ordinarios y especiales, provenientes de tanque sépticos y plantas de tratamiento de aguas residuales, dejando por fuera y sin contemplar las aguas residuales de letrinas móviles a las cuales se les deberá dar tratamiento acorde al Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales.

Este reglamento tiene como objetivos proteger la salud pública y el ambiente, regular el manejo de estos materiales en actividades agrícolas de mejoramiento de suelos, regular la

disposición en rellenos sanitarios, evitar la contaminación del suelo y el recurso hídrico por la disposición de este material sin previo tratamiento y regular la prestación del servicio de recolección, transporte, tratamiento y disposición lo cual obliga a cualquier empresa del sector público o privado a darle tratamiento a cualquier material que recolecten antes de su disposición final.

Una vez tratados, los biosólidos pueden disponerse en rellenos sanitarios y además podrán ser utilizados como acondicionadores de suelos. Sin embargo, para esta última actividad, solo podrán ser utilizados biosólidos ordinarios y los biosólidos especiales provenientes de actividades agropecuarias. Otra utilidad de estos materiales es que se pueden usar como combustibles alternos mientras se cumplan los reglamentos vigentes para esta actividad.

Ya sean empresas del sector público o empresas privadas las que brinden el servicio de recolección, tratamiento y disposición de biosólidos, ambas estarán obligadas a realizar análisis de laboratorio y será responsabilidad del laboratorio contratado realizar el muestreo de los materiales. Los análisis deberán mostrar los resultados obtenidos dependiendo del tipo de biosólidos que se esté analizando y según su finalidad. Estos parámetros se detallan a continuación:

- Biosólidos ordinarios que se dispongan en un relleno sanitario se debe determinar el porcentaje de humedad del biosólido y el pH.
- Biosólidos ordinarios que se destinen para su uso en suelos se debe determinar el porcentaje de humedad, los coliformes fecales, los nemátodos intestinales como el promedio aritmético N° de huevos por litro y el pH.
- Biosólidos especiales que se dispongan en rellenos sanitarios deben presentar el análisis de porcentaje de humedad, el pH y ciertos parámetros complementarios definidos por el Ministerio de Salud.
- Biosólidos especiales que se utilicen para uso en suelos se debe determinar el porcentaje de humedad y el pH.

En el caso de los biosólidos, ya sean ordinarios o especiales, que se utilicen en suelos, estos deberán ser provenientes de actividades agropecuarias únicamente.

Los límites máximos permitidos de los parámetros antes mencionados se encuentran en los cuadros 1 y 2 y se hace referencia al tipo de contacto que estos biosólidos tienen tanto con el ambiente, así como con el público en general.

Cuadro 1. Límites permisibles para los parámetros de análisis obligatorio de los biosólidos de tipo ordinario, según disposición final (Poder Ejecutivo, 2015).

Parámetros	Relleno Sanitario	Disposición en suelos	
		Tipo de biosólido	
		Tipo A1	Tipo B 2
Humedad (%) (máxima)	75	75	75
Coliformes fecales (UFC/g) (máximo)	no aplica	2000	2 x 10 ⁶
pH (rango)	5 - 12	5 - 12	5 - 12
Huevos de helmintos patógenos (número/por gramo sólidos totales) (máximo)	no aplica	1	10

Cuadro 2. Límites máximos permisibles para los parámetros de análisis obligatorio de biosólidos de tipo especial para su disposición final (Poder Ejecutivo, 2015).

DISPOSICIÓN FINAL		
Parámetros	Relleno Sanitario	Disposición en suelos (**)
Porcentaje de humedad	70%	70%
Poder calorífico	NA	NA
pH	5-sep	9-dic
Parámetros Complementarios	Valores establecidos en el Reglamento sobre las Características y el Listado de los Desechos Peligrosos Industriales	NA

Todos los parámetros definidos dentro del Reglamento son de acatamiento obligatorio para cualquier empresa o servicios que cuenten con tratamiento de aguas residuales y de lodos.

1.2.6.1 Reglamentos internacionales. Casos latinoamericanos.

Muchos países latinoamericanos, entre ellos Argentina, Chile, Colombia y México, cuentan con su respectivo reglamento sobre el tratamiento y uso de biosólidos y su disposición final. De esta manera si comparamos estos reglamentos con el vigente en Costa Rica, encontramos que existen diferencias muy amplias con respecto a los parámetros a determinar en el biosólido producido (Ospina et al., 2012).

1.2.6.1.1 México

La reglamentación mexicana para el tratamiento y uso de biosólidos fue publicada el 15 de agosto del 2003 en el Diario Oficial de la Federación bajo el número NOM-004-SEMARNAT-2002 como la Norma Oficial Mexicana para la Protección Ambiental – Lodos y Biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final (SEMARNAT, 2003).

Esta normativa regula y establece los límites máximos permitidos para todos los lodos producidos en los procesos de potabilización y depuración de aguas residuales urbanas en los Estados Unidos Mexicanos, esto con el fin de poder aprovechar en la medida de lo posible las propiedades de estos lodos y sino, disponer de ellos adecuadamente, para garantizar la protección de medio ambiente y de la población.

Este reglamento tiene grandes diferencias con el reglamento vigente en Costa Rica, ya que demanda el análisis y reporte de metales pesados en los lodos, los cuales no son requeridos por el reglamento de Costa Rica, en el cual se deben analizar y reportar a solicitud del Ministerio de Salud. Los metales que deben ser analizados en lodos según el reglamento mexicano son arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel y zinc. Además, solicitan el análisis adicional de *Salmonella spp.* en los resultados microbiológicos.

Además, establece clases para estos lodos dependiendo de la exposición al público y de su calidad. Se clasifican en clase A, B o C, donde los tipos A son de excelente calidad y pueden ser utilizados en contacto directo con el público; los tipos B son de calidad excelente o buena, pero se restringe a su uso urbano sin contacto con el público y el tipo C, sean de excelente o buena calidad se restringen a usos forestales, mejoramiento de suelos y agrícolas.

1.2.6.1.2 Colombia

El reglamento colombiano fue publicado el 10 de julio del 2014. Este es otro ejemplo en el cual la reglamentación exige el análisis y reporte de la concentración de metales pesados en los lodos producto de los procesos de potabilización de agua y depuración de aguas residuales. Los metales que deben ser reportados en el reglamento colombiano son los mismos que se mencionan en el reglamento mexicano incluyendo el molibdeno. Además, no se solicita el análisis de patógenos como *Salmonella spp.* (Ospina et al., 2012)

1.2.6.1.3 Chile

La normativa chilena fue publicada el 30 de enero del 2009. Esta reglamentación tiene la peculiaridad de que no se maneja el termino biosólido, sino que define como “basura, desecho o residuo semisólido que hayan generado las plantas de tratamiento”. Este, solicita

los mismos parámetros que el reglamento mexicano y no solicita análisis microbiológicos adicionales. (Ospina et al., 2012)

1.2.6.1.4 Argentina

En Argentina entró a regir por la ley N° 24.051 la cual aprueba la resolución 97 como “Reglamento para el Manejo Sustentable de Barros Generados en Plantas de Tratamiento de Efluentes Líquidos”, el 22 de noviembre del 2001 y en la cual, se solicitan los mismos parámetros que en los reglamentos anteriores. En esta normativa se hace énfasis en que “los lodos son los productos originados en la transformación de barros orgánicos a través de tratamientos destinados a reducir su nivel de patogenicidad, su poder de fermentación y su capacidad de atracción de vectores y a otorgarles aptitud para su utilización agrícola y para la recuperación de suelos y sitios degradados”. (Ospina et al., 2012)

1.2.6.2 Límites máximos permitidos en los Reglamentos internacionales. Casos de Latinoamérica.

La legislación vigente en los diferentes países tiene un mismo fin: determinar la calidad de los lodos que están produciendo y definir los límites máximos permitidos de los parámetros necesarios para garantizar que no sean un problema ambiental y salvaguardar la salud pública. Así podemos resumir en la cuadro 3, la lista de metales pesados solicitados por los reglamentos de diferentes países y así visualizar cómo varían estos de país a país. Además de determinar lo importante que sería complementar nuestro reglamento.

Cuadro 3. Límites máximos permitidos de metales pesados en los reglamentos de tratamiento, uso y disposición de lodos de diferentes países latinoamericanos y Norteamérica y la situación en Costa Rica (Elaboración propia).

País		Argentina	Chile		Colombia		Mexico		USEPA	Situación Costa Rica	Referencia Libro Jairo Alberto Romero	
	Unidad de medida	Biosólido valores máximos permisibles	Categoría Biosólidos valores máximos permisibles		Categoría Biosólidos valores máximos permisibles		Categoría Biosólidos valores máximos permisibles		Categoría Biosólidos valores máximos permisibles	Categoría Biosólidos valores máximos permisibles(*)	Composición típica de un lodo digerido	
Variable	mg/kg de biosólido (base seca)		A	B	A	B	EXCELENTES	BUENOS			Intervalo	Típico
Arsénico (As)		75	20	40	20	40	41	75	41	5	NA	NA
Cadmio (Cd)		20-40	8	40	8	40	39	85	39	1	5 - 260	10
Cobre (Cu)		1000-1750	1000	1200	1000	1750	1200	3000	1500	NA	280-2570	970
Cromo (Cr)		1000-1500	NA	NA	1000	1500	1500	4300	1200	5	200-1280	375
Mercurio (Hg)		16-25	10	20	10	20	17	57	17	0,2	0,00043 - 0,0047	0,0021
Molibdeno (Mb)		NA	NA	NA	18	75	NA	NA	18	NA	7,0 - 97	12
Níquel (Ni)		300-400	80	420	80	420	420	420	420	5	23 - 410	120
Plomo (Pb)		750-1200	300	400	300	400	300	840	300	5	200 - 1280	375
Selenio (Se)		NA	50	100	36	100	NA	NA	36	1	NA	NA
Zinc (Zn)	2500-4000	2000	2800	2000	2800	2800	7500	2800	NA	400 - 5130	1 - 600	

*Valores tomados del Reglamento sobre las características y listado de los desechos peligrosos industriales N° 27000-MINAE-2013. Estos valores tienen unidades de mg/L ya que son valores establecidos para el vertido de materiales peligrosos a afluentes de agua y fueron extraídos de lixiviados considerados tóxicos y peligrosos.

2. Capítulo II. Objetivos

2.1. Objetivo general

Evaluar la composición química y microbiológica de los lodos producidos en el proceso de depuración de las aguas residuales en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos, para su valoración como insumo para el sector agrícola.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar mediante análisis químicos las características de los lodos producidos en el proceso de depuración de aguas de carácter residual de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos.
- Realizar las determinaciones microbiológicas y físicas (coliformes fecales, huevecillos de helmintos patógenos, pH y porcentaje de humedad) para la determinación del cumplimiento de los parámetros establecidos por el Decreto Ejecutivo 39316-S: Reglamento para el manejo y disposición final de lodos y biosólidos (Poder Ejecutivo, 2015).
- Analizar el efecto de la aplicación de los biosólidos analizados en un cultivo agrícola mediante la realización de pruebas controladas de siembra y crecimiento.

3. Capítulo III. Metodología.

3.1. Sección experimental

3.1.1 Ubicación del punto de muestreo.

Se realizó una visita a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos con el fin de determinar e identificar el punto de muestreo de los lodos generados durante el tratamiento de las aguas residuales. Este punto se encuentra al final de la línea de deshidratación de lodos luego de las centrifugas de deshidratación, en el tornillo sin fin posterior al ingreso de los lodos al silo de almacenamiento. En la figura 2 se muestra la localización de este punto de muestreo mediante un diagrama de flujo de la línea de deshidratación de lodos junto con una fotografía del tornillo sin fin.

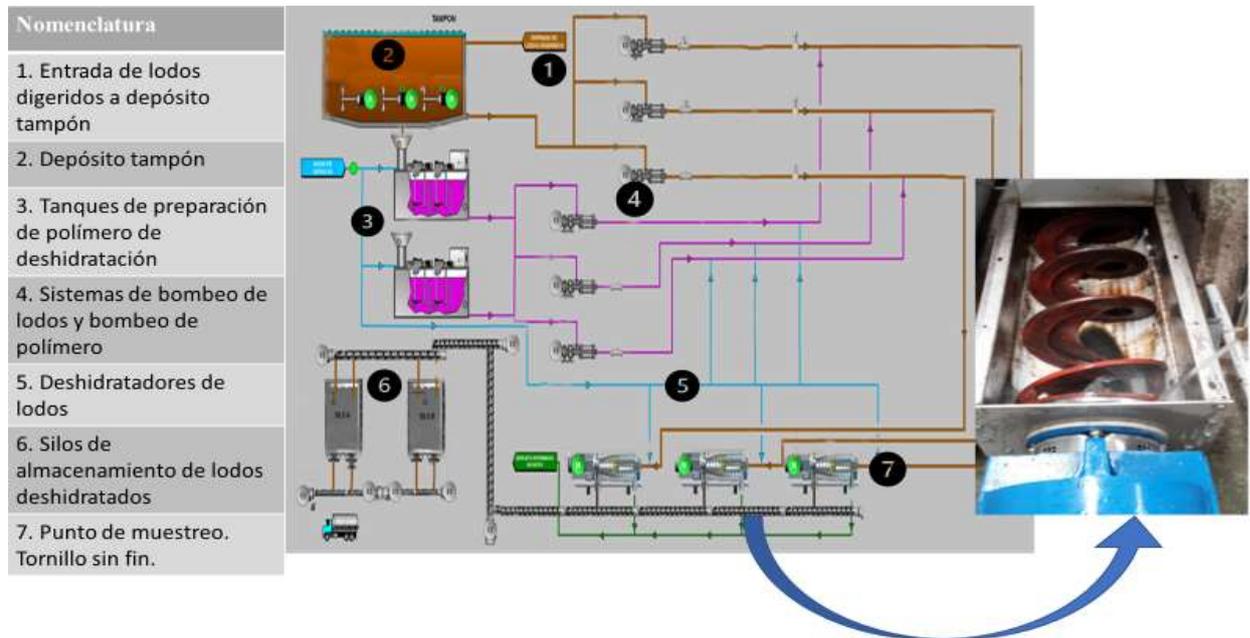


Figura 2. Imagen de la línea de deshidratación de lodos y localización fotográfica del punto de muestreo en el tornillo sin fin. Fuente: PTAR Los Tajos (2017)

3.1.2 Sistema de muestreo.

Se utilizaron botellas de vidrio de borosilicato transparente para el almacenamiento de la muestra. La muestra es recolectada con una paleta de plástico, la cual se introduce dentro del tornillo conforme los lodos son enviados hacia el silo de almacenamiento. El muestreo fue

compuesto y se recolectaron al menos 3 submuestras en la salida del sistema de deshidratación, según la planificación de la operación de la planta durante al menos 30 minutos o dividiendo el tiempo de operación del sistema entre tres para que fuera representativo, se unieron las tres submuestras para conformar la muestra compuesta de lodo (LNA, 2021).

3.1.3 Muestreo

El muestreo de lodos se realizó en los meses de octubre y noviembre, en los cuales se tomaron 11 muestras, distribuidas en 5 muestras en el mes de octubre del 2019 y 6 muestras en el mes de noviembre del 2019, en horarios establecidos según el plan de muestreo operativo del Laboratorio de la PTAR Los Tajos y siguiendo la metodología de muestreo compuesto del Laboratorio Nacional de Aguas AYA-PT-020-5 (LNA, 2021) según el tiempo en que se producía cada lote de lodo deshidratado en la centrifuga, Las muestras se recolectaron en horas de la mañana, donde no se presentó ninguna anomalía durante el muestreo ni se reportaron problemas operativos durante la generación de los lotes de lodo deshidratado muestreados.

3.1.4 Análisis y preparación de las muestras.

El análisis de las muestras se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio Nacional de Aguas del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (LNA), utilizando las metodologías de análisis y los equipos de laboratorio con los que cuenta en estas instalaciones. Este laboratorio es ente rector en el análisis de agua potable y residual, además cuenta con acreditación en la Norma ISO/INTECO 170025:2017 por parte del Ente Costarricense de Acreditación (ECA), lo que garantiza que los análisis fueron realizados bajo los más altos estándares de calidad.

El área de aguas residuales del LNA cuenta con las metodologías implementadas, validadas y en proceso de acreditación de los análisis de humedad, materia seca, materia volátil, coliformes fecales y huevecillos de helmintos en matriz de lodos. Para los análisis de metales pesados, nitrógeno y fósforo en muestras de lodos no se cuenta con una metodología especializada para la preparación de la muestra de lodos, sin embargo, si cuenta con las metodologías de cuantificación validadas. Por lo que para estos análisis se aplicó la metodología de digestión de las muestras sólidas para la correcta implementación de los métodos usados en el LNA en matriz acuosa.

Las muestras requirieron preparación previa a los análisis de metales, de nitrógeno y de fósforo, ya que estas se encuentran en una matriz sólida (lodos deshidratados), lo que permitió en este estudio implementar las metodologías de digestión por micondas previo a estos análisis para facilitar su manipulación y estudio en fase acuosa.

3.1.4.1. Digestión de las muestras de lodos.

La digestión de las muestras de lodos se realizó acorde al método EPA 3051^a (Agencia de Protección Ambiental, 1994) para muestras de lodos provenientes de sistemas de tratamiento y alcantarillado sanitario (Christiana, 2012). Se procedió al pesaje de 250 mg de lodos, los cuales se colocaron en un recipiente de Teflón propio del digestor de microondas. A cada muestra se le añadieron 10 mL de ácido nítrico concentrado grado traza metal (67% - 70% de ácido nítrico) y se agitó el recipiente. Luego de esperar 10 minutos para que la muestra se estabilice, se introdujeron los recipientes en el microondas de digestión marca Berhoff Speedwave Xpert, el cual cuenta con la programación del método en su sistema. Esta programación del método de digestión realiza en un periodo de 15 minutos una rampa de calentamiento de los 0° C a los 250° C y un aumento paulatino en la presión del sistema de 0 psi a los 80 psi y finalizado este periodo, cuenta con un lapso de estabilización y enfriamiento de 5 minutos.



Figura 3. Digestor de microondas con sistema de centrifuga Berhoff Speedwave Xpert.

Como resultado se obtuvo una solución transparente con un poco de arena en el fondo, la cual corresponde a silicatos insolubles en el ácido nítrico, los cuales no tienen relevancia en este estudio.

3.1.4.2. Determinación de metales por la técnica de ICP-MS.

La determinación de metales en las muestras de lodos una vez digeridos por el método EPA 3051^a (Agencia de Protección Ambiental, 1994) se efectuó utilizando el método del Standard

Methods, APHA (2005) referencia 3125- Metals by inductively coupled plasma-mass spectrometry modificado bajo el procedimiento AyA-PT-100-2 (LNA, 2021).

Se realizó una serie de curvas de calibración para cada metal a determinar en el equipo de ICP-MS Agilent 7700 en el rango de concentraciones de 0, 2, 20, 50, 100, 400 y 1200 ppm de cada metal. Estos metales son aluminio, hierro, cobre, manganeso, arsénico, plomo, cadmio, cromo, mercurio, níquel, selenio, antimonio y zinc.



Figura 4. Acoplador de plasma inductivo con detector de masas para el análisis de muestras de metales.

Al no conocer con certeza la concentración de metales en las muestras de lodos, fue necesario realizar pruebas de dilución a las muestras y medirlas en el ICP-MS. Los resultados de estas pruebas demostraron que una dilución con un factor de 0,02 (lo que es igual a 1 mL de muestra digerida en 50 mL de volumen final) es la más factible para el análisis de metales por esta técnica.

Con el factor de dilución establecido, se procedió a preparar las muestras, las cuales fueron filtradas con papel Whatman 541 sin cenizas, para evitar que sólidos presentes en las muestras obstruyan los conductos del equipo de ICP-MS. Una vez filtradas las muestras, se determinó la concentración de metales en las muestras de lodos en el ICP-MS.

3.1.4.2.1. Determinación de las curvas de calibración para una variedad de metales analizados por la técnica de Plasma de Acoplamiento Inducido con detector de masas (ICP-MS).

La preparación de las curvas de calibración para el método de análisis de metales por ICP-MS consiste en 3 fases:

1. La preparación de una primera mezcla de metales, los cuales se encuentran en mayor proporción en muestras de aguas y suelos, ya que son considerados oligoelementos o elementos necesarios para el funcionamiento del organismo. Estos metales son el aluminio (Al), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn) y zinc (Zn).
2. La preparación de una segunda mezcla de metales, los cuales son llamados metales pesados ya que por sus propiedades químicas resultan en una alta toxicidad para el medio ambiente y para el ser humano y que en condiciones normales se encuentran en niveles de trazas tanto en aguas como en suelos. Estos metales son arsénico (As), selenio (Se), níquel (Ni), cromo (Cr), plomo (Pb), cadmio (Cd) y antimonio (Sb).
3. La preparación de una tercera solución específica para el metal mercurio (Hg).

Una vez determinadas las diferentes mezclas de metales para la preparación de las curvas de calibración se prepararon los patrones correspondientes a partir de las soluciones madres certificadas. Se realizó de la siguiente manera:

1. Para la mezcla número 1 y número 2, se tiene una solución madre de mezcla de metales de una concentración de 10000 µg/L. De esta solución madre se prepara una solución intermedia de 2000 µg/L y se procede a preparar los respectivos patrones en concentraciones de 0.00, 2.00, 20.00, 50.00, 100.00, 400.00 y 1200.00 µg/L. con estos patrones obtendremos los primeros 7 puntos de las curvas de calibración.
2. Para la preparación de la solución de mercurio (Hg), se tiene inicialmente una solución madre certificada de Hg, de la cual preparamos otra solución intermedia de 100.00 µg/L y de la cual se toman las alícuotas correspondientes para cada punto de la curva, la cual va en concentraciones de 0.1, 0.25, 0.50, 0.80, 1.00, 1.50 y 2.00 µg/L.

La tabla 4 resume los 14 puntos a determinar en las curvas de calibración y las correspondientes alícuotas a tomar de la solución intermedia preparada con este fin para ambas mezclas.

Las curvas de calibración de los diferentes metales analizados por esta técnica se encuentran en los anexos del este documento.

Cuadro 4. Preparación de patrones para curvas de calibración de metales en ICP-MS.

Patrón metales (µg/L)	Patrón Mixto intermedio de Metales (mL) para determinación en alto rango	Patrón Disolución madre de Hg (µg/L)	Patrón intermedio de Hg (mL) para determinación en bajo rango
P1: 0.00	0.00	P8: 0.10	0.05
P2: 2.00	0.05	P9: 0.25	0.125
P3: 20.00	0.50	P10: 0.50	0.25
P4: 50.00	1.25	P11: 0.80	0.40
P5: 100.00	2.50	P12: 1.00	0.50
P6: 400.00	10.00	P13: 1.50	0.75
P7: 1200.00	30.00	P14: 2.00	1.00

3.1.4.3. Determinación de Nitrógeno Total Kjeldahl

La determinación de nitrógeno total Kjeldahl en las muestras de lodos se realizó con el método Standard Methods, APHA (2005) referencia 4500-N_{org} B. Macro-Kjeldahl Method modificado bajo el procedimiento AyA-PT-031-5 (LNA, 2022).

Se efectúa el análisis de nitrógeno orgánico Kjeldahl inicialmente tomando un volumen de 30 mL de muestra, la cual fue tratada previamente en el digestor de microondas para obtener una muestra líquida, ya que esta inicialmente se encontraba en fase sólida, con la diferencia de que, en lugar de realizar la digestión de lodos con ácido nítrico concentrado, se utilizó ácido sulfúrico concentrado grado traza metal con el fin de no aportar nitrógeno a la solución final de digestión y se vertió en un balón de destilación Kjeldahl de 800 mL al cual, en frío, se le adicionan 50 mL de la solución de digestión de ácido sulfúrico, sulfato de cobre y óxido de mercurio (II) como catalizadores.

La importancia de realizar esta segunda digestión es que la mezcla de catalizadores junto con el ácido sulfúrico transformará todos los diferentes compuestos nitrogenados en sales de amonio, las cuales no se forman en la primera digestión en el equipo de digestión por microondas por la ausencia de los catalizadores, sino que se mantienen en formas de óxidos de nitrógeno, urea y otros compuestos en la solución acuosa.

Una vez vertida la muestra en el balón de Kjeldahl, se coloca en el dispositivo de digestión y se digiere hasta la aparición de humo blanco de SO₃. El calentamiento se realiza continuamente hasta obtener un volumen aproximado de 25 mL y la solución presente una coloración verde esmeralda. Se continúa con la digestión por media hora más.

Tras la digestión, se enfría la muestra y se añaden 300 mL de agua desionizada. Con cuidado, lentamente y con agitación constante, se agregan 50 mL de la solución de hidróxido de sodio y tiosulfato de sodio y unas cuantas gotas de fenolftaleína hasta obtener una coloración rojiza.

Se coloca el balón de Kjeldahl en el instrumento de destilación y se dispone a destilar alrededor de 150 mL de la solución, la cual debe ser recolectada bajo la superficie de una solución de ácido bórico 0,04M que servirá como absorbente. El destilado se recoge en Erlenmeyer de 250mL y luego transfiere el destilado cuantitativamente a un balón aforado de 250mL, el cual se afora con agua desionizada.

El método de Nesslerización permite determinar la concentración de amoníaco (NH₃) o el ion amonio en muestras de agua. A 10 mL la muestra se le agregó 1 mL de reactivo de Nessler (tetrayodomercuriato (II) de potasio en una solución de 2,5M de hidróxido de potasio), el cual generará una coloración amarilla o naranja en la muestra. Este reactivo es sumamente tóxico y debe manejarse con cuidado y luego ser desechado según las normas para el manejo de desechos tóxicos.

Una vez coloreada la muestra, se coloca en el espectrómetro Hach DR2100 y se mide a 425 nm. Se tabularon los resultados obtenidos y se aplica la fórmula de ajuste para obtener el valor real de nitrógeno total en la muestra.

3.1.4.4. Determinación de sodio y potasio

La determinación de sodio y potasio en las muestras de lodos se realizó con el método Standard Methods, APHA (2005) referencia 3500-Na. Flame Emission Photometric Method y 3500-K. Flame Photometric Method modificado bajo el procedimiento AyA-PT-042-3 (LNA, 2021).

En la determinación del sodio y del potasio se utilizó la técnica de fotometría de llama en un fotómetro de llama Perkin Elmer modelo 2655-10 Dual Channel Flame Photometer.



Figura 5. Fotómetro de llama Perkin Elmer modelo 2655-10 Dual Channel Flame Photometer.

Las muestras fueron digeridas de igual forma que se hizo para su análisis en ICP-MS, utilizando ácido nítrico grado traza metal (67 – 70%).

Se filtraron las muestras con papel Whatman 41 sin cenizas para eliminar impurezas que pudieran obstruir los conductos del fotómetro. La lectura de las muestras nos da como resultado la emisión correspondiente a la concentración de cada analito y posteriormente se calculó la concentración de estos.

3.1.4.5. Determinación de Fósforo Total

La determinación de fósforo total en las muestras de lodos se realizó con el método Standard Methods, APHA (2005) referencia 4500-P D. Stannous Chloride Method modificado bajo el procedimiento AyA-PT-028-4 (LNA, 2022).

La determinación de fósforo total se realiza en dos partes. La primera consiste en la digestión ácida de la muestra y la segunda la determinación espectrométrica de fósforo total por el método de cloruro de estaño (II).

El primer paso es posible realizarlo de dos maneras: 1. Digestión ácida en microondas cuyo procedimiento fue descrito en el apartado de digestión de la muestra (apartado 3.1.4.1), o 2. digestión con ácidos fuertes durante dos horas de la muestra sólida. (Este segundo método de digestión es lento y no asegura que pasado el tiempo de digestión toda la muestra haya sido transformada a fase líquida, por lo que se eligió el método de digestión por microondas para el tratamiento de las muestras). La digestión de la muestra es primordial para la conversión del fósforo contenido en compuestos orgánicos en fosfato inorgánico o pirofosfato, los cuales serán más fáciles de cuantificar como fósforo total.

Una vez se cuente con la solución de digestión, se proceder a agregarle de 2 a 5 gotas de fenolftaleína y utilizando hidróxido de sodio 6M se neutraliza la muestra hasta obtener una coloración rosada, la cual será filtrada con un papel de filtro Whatman 42. El filtrado se recogió en un balón de 100 mL y se aforó con agua desionizada.

La segunda etapa del análisis de fosforo total requiere tomar una alícuota de 50 mL de la muestra digerida y de coloración rosada en un Erlenmeyer de 100 mL. Como precaución para evitar la contaminación de la muestra realice lavados de ácido clorhídrico 1+1 a los erlenmeyer que utilizará y lave con agua desionizada cada uno luego de agregar el ácido.

A cada erlenmeyer con muestra se le adicionan con agitación constante 2,0 mL de molibdato de amonio y 0,25 mL (5 gotas) de cloruros de estaño (II). La formación de un color azul fuerte en la muestra depende de la temperatura ambiental, por cada grado Celsius se da un incremento de color del 1%. El análisis debe efectuarse en un rango de temperaturas de 20 a 30 grados Celsius y con no más de 2 grados Celsius de diferencia entre las muestras y los patrones. Después de 10 minutos, pero no más de 12 minutos, mida cada muestra, los patrones y el blanco en el espectrómetro a 890 nm. Los resultados obtenidos fueron tabulados en tablas de cálculo y se les aplicó la fórmula de ajuste para obtener el valor real de fósforo total en la muestra.

3.1.4.6. Determinación de pH

La determinación de pH en las muestras de lodos se realizó con el método Standard Methods, APHA (2005) referencia 4500-H⁺. Electrometric Method modificado bajo el procedimiento AyA-PT-035-2 (LNA, 2021).

La determinación de pH en muestras de lodos se realizó pesando una masa de 10g aproximadamente de cada muestra. Esta masa se llevó a sequedad a 105° C para eliminar el agua propia de la muestra, durante 2 horas. Una vez seco el lodo se morterizó y se pasó a través de un tamiz de 500 micras para obtener un polvo fino para el posterior análisis de pH. A cada muestra se le añadieron 20 mL en primer lugar de agua desionizada y a una segunda muestra una solución de KCl 1 M como extractor de iones hidronio, en una relación 1:2. Se determinó el pH de cada muestra con un pHmetro Orion PerpHert modelo 350.

3.1.4.7. Determinación del porcentaje de humedad total

La determinación de material orgánico total en las muestras de lodos se realizó con el método USEPA (1989) referencia EPA-833-B-89-100. Sludge Sampling and Analysis Guidance document y modificado por el método AyA-PT-066-1 (LNA, 2021).

Para la determinación de la humedad total en las muestras de lodos se mide una masa determinada del lodo (10g de muestra) y se coloca en una estufa a 105°C hasta llegar a sequedad. Una vez seca la muestra, se determina su nueva masa hasta que sea constante y por diferencia se obtiene la cantidad de agua contenida en esta y su porcentaje de humedad.

3.1.4.8. Determinación de Material Orgánico Total

La determinación de material orgánico total en las muestras de lodos se realizó con el método USEPA (1995) referencia EPA-530-R-95-036. Guidance for the sampling and analysis of combustion ash y modificado por el método AyA-PT-066-1 (LNA, 2021).

Se determinó el material orgánico total presente en las muestras de lodos por el método de pérdida de masa por ignición o incineración. Se midió una masa de 5g de la muestra y se colocó en capsulas de porcelana debidamente identificadas. Estas capsulas se colocaron en un horno mufla para su calcinación a una temperatura de 550°C por 24 horas, para garantizar que todo el material orgánico sea destruido. Una vez transcurrido el tiempo de incineración, se sacaron las capsulas del horno mufla y se colocaron en un desecador hasta que se enfriaran a temperatura ambiente y finalmente fueron pesadas.

3.1.4.9. Determinación de coliformes fecales totales

La determinación de coliformes fecales totales en las muestras de lodos se realizó con el método Standard Methods, APHA (2005) referencia 9222. Membrane Filter Technique for Members of the Coliform Group modificado bajo el procedimiento AyA-PT-108-1 (LNA, 2022).

La determinación de coliformes fecales en lodos se determina pesando inicialmente una masa de 30g de muestra fresca. Esta masa se licua con una licuadora para homogeneizar la muestra y se coloca el licuado en un erlenmeyer de 2 L.

A continuación, se realizan las diluciones consecutivas de 10 mL cada una, con una micropipeta de 10 mL y puntas estériles teniendo el cuidado de cambiar la punta entre diluciones. Los factores de dilución corresponden a -1, -2, -3 y -4.

Las diluciones con factor de dilución -3 y -4 se filtran utilizando el sistema de filtración de membrana estéril y Manifold.

Una vez filtrada la muestra, se toma el filtro y se coloca en una placa de Petri, al que anteriormente se le colocó un medio de cultivo mFC Broth. Se incuban las muestras en baño María durante 24 horas a 44,5 °C.

Por último, se realiza el recuento de colonias, de aquellas que tengan una pigmentación azul, el cual se multiplica por el factor de dilución para obtener el número de unidades formadoras de colonias (UFC).

3.1.4.10. Determinación de huevecillos de helmintos

La determinación de huevecillos de helmintos en lodos se realiza con los métodos de la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 y NOM-001-SERMANAT-1996 modificados bajo el procedimiento AyA-PT-107-1 (LNA, 2022).

En primer lugar, una masa de correspondiente a 10 gramos de materia seca, de cada una de las muestras frescas. Esta masa se coloca en una licuadora, la cual homogeneiza la muestra con una solución de detergente Tween 80 al 0,1%. Este detergente separa los huevecillos del resto de material orgánico. Seguidamente el licuado de los lodos se pasa por un tamiz de 125 micras, al cual se le realizaron lavados con agua desionizada para asegurar que todo el material pase el tamiz.

Una vez realizada la separación con el tamiz, la muestra se deja reposar por 24 horas para que todos los sólidos restantes sedimenten.

Pasadas las 24 horas, se elimina el sobrenadante con una manguera al vacío y se desecha. El sedimento se recolecta junto con un volumen pequeño de sobrenadante y se realizan lavados con agua desionizada.

Esta nueva muestra se centrifuga durante 5 minutos a 2000 rpm a 21 °C. una vez centrifugada la muestra, se elimina nuevamente el sobrenadante dejando los lodos con la menor cantidad de agua posible.

Una vez obtenida esta muestra de los lodos, se le adiciona 150 mL de sulfato de zinc al 33% con el fin de hacer flotar los huevecillos presentes en la muestra. Centrifugue nuevamente bajo las mismas condiciones.

Se recolecte el sobrenadante y se le agregó 1 L de agua para diluir el sulfato de zinc. El sobrenadante se retira nuevamente y se coloca en tubos cónicos, tantos como sea necesario, los cuales se vuelven a centrifugar. En esta ocasión, se retira y deshecha el sobrenadante y se conserva el precipitado que contiene los huevecillos.

Una vez obtenido el sedimento, se le adiciona 10 mL de una mezcla de etanol-ácido sulfúrico. Se agita con un Vortex y se espera a la formación de dos fases. Ambas fases se eliminan y al sedimento obtenido se le realiza el conteo de huevecillos.

3.1.4.11. Pruebas de crecimiento vegetal controlado

El método de crecimiento controlado o fitotoxicidad fue seleccionado del libro de Peter Calow, "Handbook of ecotoxicology" donde se exponen los protocolos de bioensayos de germinación de semillas y crecimiento de raíces para diferentes plantas incluida la de *Raphanus sativus* (Calow, 1993).

Con la finalidad de evaluar la toxicidad de los lodos producidos en la PTAR Los Tajos en un sistema de siembra agropecuario, se procedió a realizar pruebas de crecimiento en ambiente externo sin control de humedad ni iluminación tal y como se realizaría una siembra en una zona agrícola la cual se encuentra a la interperie, utilizando semillas de rábano (*Raphanus sativus*) como indicador de crecimiento ya que este cuenta con altas tasas de germinación en poco tiempo y una alta resistencia a condiciones ambientales.

Se prepararon 7 recipientes los cuales fueron acondicionados con una mezcla de un sustrato de tierra y lodos según porcentajes y a los cuales se les injertaron 10 semillas de rábanos seleccionadas al azar. Los porcentajes de tierra-lodo variaron con la finalidad de determinar si la aplicación directa del lodo al suelo tendría algún efecto inhibitor en el crecimiento vegetal. Las mezclas tierra-lodo se hicieron porcentualmente de la siguiente manera:

- Recipiente 1: 100% tierra
- Recipiente 2: 90% tierra, 10% lodos
- Recipiente 3: 80% tierra, 20% lodos
- Recipiente 4: 70% tierra, 30% lodos
- Recipiente 5: 60% tierra, 40% lodos
- Recipiente 6: 50% tierra, 50% lodos
- Recipiente 7: 100% lodos

Una vez listos los recipientes con las mezclas de tierra-lodo y las semillas, estos se observan en un periodo de 15 días. Al transcurrir este periodo, se realiza el conteo de germinación de las semillas y se determina cuantas de ellas germinaron por recipiente y cuanto no lo hicieron.

4. Capítulo IV. Resultados y discusión.

4.1. Resultados de los análisis de las muestras de lodos de la PTAR Los Tajos

4.1.1 Cuantificación de metales por ICP-MS

Los resultados de metales obtenidos para las muestras de lodos recolectadas en la PTAR Los Tajos se muestran completos en el anexo 4, los metales As, Se, Cd, Sb y Hg se encontraron por debajo del límite de detección del método, y en el cuadro 5 se muestran los metales que se lograron cuantificar que corresponden a Al, Mn, Fe, Cu, Zn, Cr, Ni y Pb. Las concentraciones de Cr, Ni y Pb presentes en las muestras es inferior a los límites establecidos en las normas internacionales estudiadas (Ospina, 2012) en el desarrollo de este proyecto y la norma nacional Reglamento para el Manejo y Disposición Final de Lodos y Biosólidos (Poder Ejecutivo, 2015). El cuadro 5 se resume las concentraciones de metales máximas, mínimas y sus promedios por muestra, según sus concentraciones, los metales analizados presentan la siguiente tendencia:

$$381.25\text{mg/kg Al} > 242.19 \text{ mg/kg Fe} > 51.33 \text{ mg/kg Zn} > 5.67 \text{ mg/kg Cu} > 3.21 \text{ mg/kg Mn} \\ > 1.22\text{mg/kg Pb} > 0.72 \text{ mg/kg Ni} > 0.45 \text{ mg/kg Cr} > 0.04 \text{ mg/kg Hg} > 0.03\text{mg/kg Cd} > \\ 0.02\text{mg/kg As} > 0.02\text{mg/kg Se} > 0.00 \text{ mg/kg Sb}$$

Podemos observar que la presencia de estos metales disminuye conforme aumenta su toxicidad para el suelo o el ambiente, y según el estudio de Méndez et al, 2009 esta tendencia tiene una incidencia en la forma en que estos metales se transportan al agua o al suelo, provenientes en gran parte de residuos de procesos industriales cercanos a fuentes de agua o zonas domesticas (Méndez et al., 2009). En el caso de las aguas residuales que recibe la PTAR Los Tajos, estas son de origen doméstico, pero al existir presencia de estos metales en los lodos aun en concentraciones bajas es recomendable identificar y generar un listado de los procesos industriales que se encuentren conectados al alcantarillado sanitario y la influencia de conexiones pluviales ilícitas que podrían incidir en el arrastre de residuos de algunos procesos industriales.

Esta tendencia podemos separarla en 3 grupos. El primer grupo lo constituyen el Al, Fe, Zn, Cu y Mn, los cuales son todos metales necesarios, en sus formas iónicas correspondientes para los procesos metabólicos de las plantas, los animales y el ser humano. Estos se encuentran en formas químicas de fácil asimilación y no representan riesgo (Méndez et al., 2009). El segundo grupo lo conforman el Pb, Ni, Cr, Hg, y Cd. De estos cinco metales únicamente el Ni tiene funcionalidad metabólica en el crecimiento vegetal sin embargo las plantas requieren menos de 0.001 mg/kg de peso seco (Mahler, 2013). Los otros cuatro metales del grupo cuentan con una toxicidad elevada y representan un riesgo ya que su bioacumulabilidad es muy alta. El tercer grupo está compuesto por As, Se y Sb los cuales se encuentran en cantidades por debajo del límite de detección, aunque por su toxicidad representan un riesgo potencial (Elloumi et al., 2017).

De esta manera podemos observar que metales como el aluminio (promedio 381.25 mg/kg), el cobre (promedio 5.67 mg/kg), el hierro (promedio 242.19 mg/kg) y el manganeso (promedio 3.21 mg/kg) se encuentran en valores superiores del límite de detección y son completamente cuantificables, sin embargo, estos metales no tienen mayor injerencia en la toxicidad de los lodos analizados, ya que se utilizan como potenciadores de suelos debido a que se encuentran en formas naturales de sales y minerales en el suelo, siempre y cuando se considere previamente un estudio del tipo de suelo en el que se fuera a aplicar (González y Garcia, 2014).

El plomo, níquel y cromo se encuentran en niveles de trazas en todas las muestras, con concentraciones promedio de 1,22 mg/kg Pb, 0,72 mg/kg Ni y 0,45 mg/kg Cr. Si comparamos estos resultados con los valores mostrados por Romero 2004, donde nos muestra que la concentración aceptable para uso agrícola y aplicación sobre el suelo es de 300 mg/kg Pb, 1200 mg/kg Cr y 420 mg/kg Ni, esto en lodos tratados, observamos que nuestros resultados se encuentran dentro de estos niveles de aceptación (Romero, 2004).

Estos resultados se asemejan al estudio realizado por Khan (Khan et al., 2014) donde podemos observar que la presencia de estos metales tiene su origen de materiales provenientes de industrias y domicilios cercanos a un cuerpo de agua y cuyos residuos industriales y domésticos fueron vertidos en este cuerpo de agua, ya sea un río o un alcantarillado pluvial. Muchos de estos materiales de los cuales provienen los metales encontrados en las muestras de biosólido son, diferenciando entre cada uno su origen:

Cromo: Residuos del cromado de materiales utilizado para aumentar la resistencia a la corrosión, pigmentos inorgánicos, acero inoxidable y baños de protección automotriz (Fair et al., 1999).

Plomo: Baterías, aditivos para gasolina, aleaciones de soldadura, residuos de amortiguación en construcción pesada, revestimiento de cable (Valdez y Vázquez, 2003).

Níquel: Aceites, residuos de industria automotriz, residuo de la fabricación de aceros, residuo de fundiciones, catalizadores entre otras fuentes (Garzón, 2021).

Tal como se mencionó anteriormente, es necesario caracterizar las aguas de origen pluvial que llegan a la PTAR Los Tajos debido a las conexiones ilícitas que están conectadas a la red de alcantarillado sanitario y establecer el tipo de actividades industriales que vierten sus desechos a esta red, para poder atribuir de forma directa estas concentraciones a algunas de las fuentes indicadas.

Por otro lado, los restantes metales (arsénico, antimonio, selenio, zinc, cadmio y mercurio) se encontraron en concentraciones menores al límite de detección por lo que no representan un riesgo para su uso en suelos. Sin embargo, es de alta importancia su análisis e identificación, ya que en este caso en particular (biosólidos de la PTAR Los Tajos) hubo resultados no significativos, pero crea un precedente en la generación de una línea base de análisis ante la aparición de nuevas conexiones a la red de alcantarillado sanitario que puedan cambiar la composición del lodo y el agua. Además, se puede replicar este estudio en otros

sistemas de tratamiento y evaluar la posibilidad de encontrar estos metales en muestras de otras plantas de tratamiento donde se generen lodos a partir de afluentes de aguas residuales de diferente origen (Alexander et al., 2006).

En estudios realizados por Ahmed Meghari y Rasha Omar (Meghari y Omar, 2017) en la PTAR de Gaza se encontraron concentraciones de 92 mg/kg Pb, 119 mg/kg Cr y 24 mg/kg Ni, además de concentraciones de otros metales muy por encima de las encontradas en los biosólidos de la PTAR Los Tajos. Ya que a diferencia de la PTAR Los Tajos, esta PTAR trata aguas provenientes de centros industriales y además por tratarse de una zona en conflicto militar, de los cuales se generan residuos que llegan a la planta. Sin embargo, estos se encuentran dentro de los límites permitidos bajo estándares internacionales de la USEPA y regionales de Jordania y Egipto.

De esta manera podemos observar en el cuadro 5, que los resultados obtenidos en los análisis de Pb (1,22 mg/kg), Cr (0,45 mg/kg) y Ni (0,72 mg/kg) se encuentran en concentraciones aceptables para lodos de origen de actividad doméstica y comercial según el reglamento RTCR 485:2016 Reglamento de sustancias químicas, fertilizantes y enmiendas para uso agrícola. Tolerancias y límites permitidos para la concentración de los elementos nutritivos, metales pesados e impurezas (Poder Ejecutivo, 2016), que eventualmente pueden tener una disposición final como biosólidos, ya sean tipo A o tipo B, contemplando las concentraciones de metales obtenidas.

Cuadro 5. Concentración de metales pesados analizados por triplicado en matriz líquida de la digestión y analizados en ICP-MS en lodos de la PTAR Los Tajos expresados como miligramo de metal presente por kilogramo de muestra.

Muestra	Aluminio	Manganeso	Hierro	Cobre	Zinc	Cromo	Níquel	Plomo
	Promedio (±11,3mg/kg)**	Promedio (±11,3mg/kg) **	Promedio (±11,3mg/kg)**	Promedio (±11,3mg/kg)**	Promedio (±11,3mg/kg)**	Promedio (±1,3mg/kg)**	Promedio (±1,3mg/kg)**	Promedio (±1,3mg/kg)**
LLD-01TS	540,97	3,40	296,37	13,60	63,70	0,60	0,60	1,50
LLD-02TS	355,50	3,23	212,07	4,60	39,57	0,40	0,53	1,13
LLD-03TS	415,57	4,20	477,97	3,63	109,63	0,43	0,77	1,97
LLD-04TS	437,03	3,17	231,67	3,80	44,80	0,53	1,17	1,00
LLD-05TS	239,53	2,27	156,90	5,70	31,00	0,37	0,60	0,77
LLD-06TS	293,60	2,67	190,37	4,53	40,77	0,40	1,23	0,97
LLD-07TS	322,83	3,47	197,90	9,67	57,20	0,40	0,67	1,70
LLD-08TS	340,97	3,27	188,97	6,20	69,07	0,40	0,70	1,47
LLD-09TS	414,80	3,20	226,87	4,47	35,27	0,43	0,57	1,07
LLD-10TS	423,77	3,37	245,73	3,37	42,13	0,43	0,57	0,87
LLD-11TS	409,17	3,10	239,33	2,77	31,47	0,60	0,53	1,00
Constituyentes inorgánicos presentes en lixiviados***	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	5.00	5.00	5.00

Promedio	381,25	3,21	242,19	5,67	51,33	0,45	0,72	1,22
Máximo	540,97	4,20	477,97	13,60	109,63	0,60	1,23	1,97
Mínimo	239,53	2,27	156,90	2,77	31,00	0,37	0,53	0,77
SD*	81,84	0,48	86,34	3,23	23,12	0,08	0,25	0,38

*SD: Desviación estándar.

**Incertidumbre del método: Alto rango: $\pm 11,3$ mg/kg de muestra y bajo rango: $\pm 1,3$ mg/kg de muestra.

*** Concentraciones de metales considerados tóxicos dentro del marco del Reglamento sobre las características y listado de los desechos peligrosos industriales N° 27000-MINAE-2013. La concentración de estos metales se encuentra en mg/L ya que son valores obtenidos de la extracción de un lixiviado de carácter tóxico y peligroso. Donde N/A significa No Aplica.

4.1.2 Análisis fisicoquímico de las muestras.

En el cuadro 6 se muestra que la determinación de la humedad en el periodo en que se tomaron y analizaron las muestras de lodos, presentó un valor promedio de 70,25% (con un mínimo de 67,85% y un máximo de un 72,69%). Los resultados de este análisis para todas las muestras se encuentran en el anexo 5.

Cuadro 6. Análisis de humedad y material orgánico en las muestras de lodos de la PTAR Los Tajos.

ID muestra	Porcentaje de Masa Seca (%) ($\pm 0,45$ mg/g)**	Humedad (%) ($\pm 0,45$ mg/g)**	Porcentaje de Cenizas (%) ($\pm 0,27$ mg/g)**	Porcentaje de Material Orgánico (%) ($\pm 0,27$ mg/g)**
LLD-01TS	32,15	67,85	14,14	85,86
LLD-02TS	29,47	70,53	13,69	86,31
LLD-03TS	30,28	69,72	14,05	85,95
LLD-04TS	27,31	72,69	11,99	88,01
LLD-05TS	27,55	72,45	12,57	87,43
LLD-06TS	28,28	71,72	12,95	87,05
LLD-07TS	29,50	70,50	13,46	86,54
LLD-08TS	31,29	68,71	14,36	85,64
LLD-09TS	29,96	70,04	13,78	86,22
LLD-10TS	30,47	69,53	14,54	85,46
LLD-11TS	31,05	68,95	14,69	85,31
Promedio	29,75	70,25	13,66	86,34
Valor Max	32,15	72,69	14,69	88,01
Valor Min	27,31	67,85	11,99	85,31
SD*	1,50	1,50	0,90	0,90

*Desviación estándar

**Incertidumbre del método.

Los lodos producidos en la PTAR Los Tajos y analizados en el presente estudio, tal como se muestra en el cuadro 6 contienen en promedio 70,25% de humedad luego del proceso de deshidratación a la que se ven sometidos. Este resultado demuestra el cumplimiento con el Reglamento N° 39316-S Reglamento para el manejo y disposición final de lodos y biosólidos, donde el valor máximo permitido para humedad en biosólidos es del 70% y el 45,4% de las muestras analizadas cumple con este criterio tanto para biosólidos tipo A como para tipo B (Poder Ejecutivo, 2015). Respecto a las muestras que no cumple el porcentaje de Humedad es importante considerar que la PTAR Los Tajos al tratar aguas residuales de origen sanitario implica que los lodos que se generan del proceso de tratamiento primario son exclusivamente lodos ordinarios. Sin embargo, debido a que en el proceso de deshidratación de los lodos se utiliza polímero catiónico de poliacrilamida reticulada, según el Reglamento para el manejo disposición final de lodos y biosólidos, el biosólido generado pasa de ser ordinario a tener condición de un biosólido especial. Y se exige por lo tanto un nivel de deshidratación mayor (70% de humedad) a lo que realmente se acostumbra a obtener para plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas con sistema de tratamiento de lodos por centrifugas en las que se obtienen valores de humedad superiores o iguales al 75% (Morera, 2018).

Esta humedad presente en los lodos se debe a la presencia de agua intersticial que se encuentra entre los flóculos del lodo causado por fuerzas capilares entre el sólido y el agua. (Alvarenga et al., 2017) También es causa del agua superficial que se encuentra recubriendo la superficie de pequeñas partículas en el lodo y, por último, el agua intracelular que es la contenida por células y microorganismos que están presentes en los lodos (PTAR Los Tajos, 2017).

Para el parámetro pH el valor promedio fue de 6,95 con un mínimo de 6,26 y un máximo de 8,23 en agua desionizada y con un valor promedio de 7,05 y valor mínimo de 6,76 y un máximo de 7,74 en KCl. Los datos de análisis se encuentran resumidos en el anexo 6. Los resultados de estos análisis demuestran el cumplimiento a la normativa del Reglamento N° 39316-S Reglamento para el manejo y disposición final de lodos y biosólidos, donde el rango de pH de estos biosólidos debe encontrarse en un rango de 5 a 12 para ambos tipos de biosólido (tipo A o tipo B), por lo que los resultados de los análisis son favorables en el 100% de las muestras analizadas (Poder Ejecutivo, 2015). Se realiza el análisis de pH con agua, así como con KCl ya que en suelos o lodos es posible diferenciar entre la acidez de reserva y la acidez activa. La acidez activa es la proporción de iones “ácidos” (H^+) que extrae el agua de la muestra de suelo o lodo, mientras que la acidez de reserva es aquella que ha sido extraída con la solución de KCl, la cual tiene la capacidad de aumentar el desplazamiento de iones H^+ . El significado práctico de esta determinación es que por cada unidad de cambio de pH esto corresponde a un incremento o disminución de 10 veces la acidez o la basicidad del suelo (Campillo y Sadzawka, 2006). El porcentaje de desvío relativo entre métodos fue de 6.85% y como podemos observar en el gráfico 1, la tendencia es similar para ambos métodos.

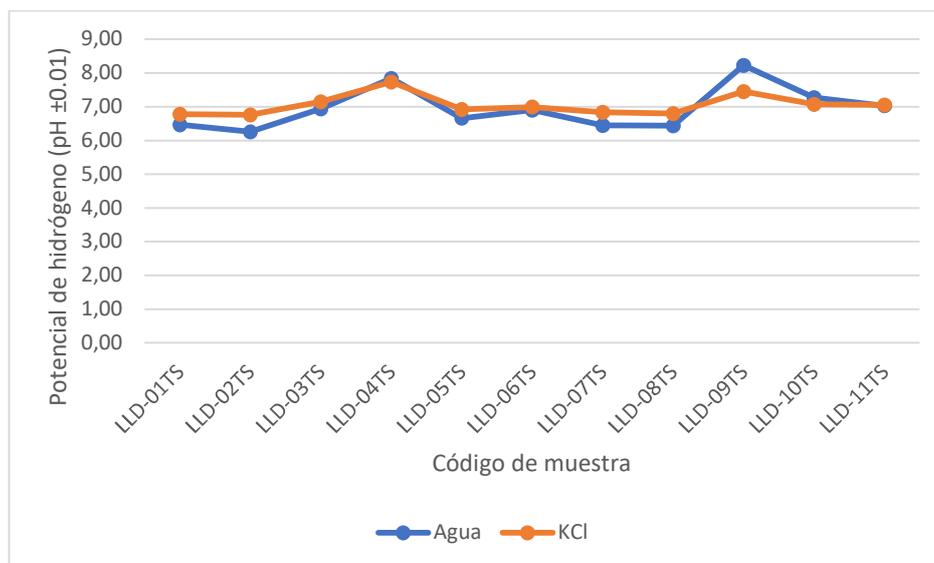


Gráfico 1. Determinación de pH en muestras de lodos.

Para utilizar el biosólido de la PTAR Los Tajos en el suelo además de cumplir con los parámetros del reglamento mencionados, es importante conocer el pH del suelo en el que se va a aplicar ya que el pH es un indicador de la salud del suelo y regula la movilidad de iones en el suelo, la formación de precipitados y la disolución de minerales los cuales llegaran a formar parte del sistema nutricional del suelo (Liebig et al., 2002). Así mismo se debe contemplar si además del biosólido en el suelo se van a incorporar fertilizantes ya que la regulación del pH en el suelo se ve afectada por la incorporación continua de estas enmiendas (Liebig et al., 2002), la cual altera el pH del suelo, disminuyéndolo y provocando la acidificación y la disminución de la capacidad tampón de este.

Los macronutrientes analizados (N y P), los micronutrientes (Na y K) y el porcentaje de material orgánico total se encuentran en valores adecuados por el RTCR 485:2016 como se ven en el cuadro 7. Este valor de estos parámetros se expresa como el mínimo permitido y corresponde al 0,5% del resultado analizado expresado en porcentaje de materia seca o en mg/kg de muestra.

En cuanto a las concentraciones obtenidas de nitrógeno, fósforo y potasio, se han reportado en estudios anteriores que las concentraciones más favorables, de acuerdo Hue y Silva (Hue y Silva, 2000), el crecimiento de las plantas ronda el 3%, 0,2% y 0,4% de estos elementos respectivamente, mientras que los resultados de este estudio muestran valores de 0,957%, 0,189% y 0,52% de nitrógeno, fósforo y potasio respectivamente (Tisdale y Werner, 1991).

La determinación de nitrógeno total Kjeldahl en lodos de la PTAR Los Tajos tuvo como resultado una concentración promedio de 17,00 mg/g, con un valor máximo de 28,82 mg/g y un valor mínimo de 4,53 mg/g. Esta determinación se realiza a las muestras de lodos con el fin de determinar el contenido total de nitrógeno que está presente en estas muestras, ya que, al tratarse de lodos de carácter doméstico, tendrán en su contenido concentraciones representativas de nitrógeno proveniente de proteínas, urea, aminoácidos y otros compuestos

orgánicos desechados en forma de excretas por el ser humano y tiene una gran importancia en el crecimiento vegetal y el desarrollo de cultivos cuando es agregado como enmienda al suelo (Tisdale y Werner, 1991).

El sodio y el potasio son analitos de alta importancia en las muestras de lodos, más en aquellas que se dispondrán para el tratamiento de suelos y cultivos. Las concentraciones promedio obtenidas en estos análisis fueron 14,90 mg/g Na, con un máximo de 16,70 mg/g Na y un mínimo de 12,03 mg/g Na; mientras que la concentración promedio para el potasio fue de 5,17 mg/g K con un máximo de 6,23 mg/g K y un mínimo de 4,30 mg/g K.

Nada Elloumi (Elloumi et al., 2016) cuantificó en muestras de biosólidos utilizados en la siembra y cultivo de tomate, el sodio y el potasio, obteniendo como resultados concentraciones de 7,97 mg/g Na y de 4,38 mg/g K. El resultado de potasio fue similar al obtenido en este estudio con una diferencia de 0,34 mg/g K., mientras que la concentración de sodio fue mayor con una diferencia de 7,93 mg/g Na. Estas concentraciones no generan afectación para aplicación en suelos.

Estos dos elementos tienen una alta importancia nutricional para las plantas ya que son agentes osmóticos en el metabolismo y reguladores hidrostáticos. Por ejemplo, el sodio facilita la absorción de CO₂ y activa parcialmente enzimas (ADP-glucosapirifosforilasa) dentro del metabolismo de la planta que forma parte de la síntesis del almidón (Tisdale y Werner, 1991).

En el suelo se encuentran en estados combinados y principalmente formando sales. Cuentan con una baja energía de adsorción al suelo por lo que altos niveles pluviales son capaces de lixiviarlos a horizontes más profundos del suelo en los cuales las raíces de las plantas no tienen penetración y generando un déficit nutricional. Caso contrario sucede en regiones áridas donde las lluvias son escasas lo que genera que se acumulen en los horizontes más cercanos a la superficie (Tisdale y Werner, 1991).

Ambos elementos tienen la característica de alcalinizar el suelo. Esto suele darse en suelos de tipo arcilloso con altas concentraciones de estos elementos. Al haber presencia de agua ya sea por la cercanía del manto freático o lluvia y de dióxido de carbono, estos elementos se ionizan en Na⁺ o K⁺ y se liberan OH⁻, formando hidróxidos que alcalinizan el suelo alcanzando niveles de pH de 9 o superiores (Tisdale y Werner, 1991).

La determinación de fósforo total se obtuvo como resultado una concentración promedio de 1,89 mg/g P, con una concentración máxima de 2,76 mg/g y una concentración mínima de 1,24 mg/g. En estudio realizados por Ahmad (Ahmad et al., 2016) en Ghaziabad, India encontraron que la concentración de fósforo en las muestras es baja con respecto a productos fabricados, obteniendo como resultado 1,7 mg/g P. Este resultado es muy similar al resultado obtenido en los biosólidos de la PTAR Los Tajos, sin embargo, se encuentra cercano a lo que establece el reglamento de RTC485:2016 del MAG en el que se establece que una concentración de 2,20 mg/Kg de P ya se puede utilizar como enmienda.

El fósforo se encuentra presente en el suelo debido a la descomposición de materia orgánica de origen animal y vegetal pero su baja solubilidad en el suelo dificulta su adsorción y esta baja adsorción se ve reflejada en la baja disponibilidad del elemento para la nutrición vegetal. Esto se debe a que la fracción soluble de fósforo que es muy pequeña se encuentra en equilibrio con la fracción lábil que está compuesta de fósforo orgánico fácilmente mineralizable y los fosfatos que son poco solubles y muy poco adsorbidos por el suelo (Bowman y Cole, 1978).

Al usar estos lodos como suplemento para el suelo, es importante tomar en cuenta el aporte de material orgánico que se estaría agregando al sitio de siembra. Este material orgánico contribuye al mejoramiento de la estructura del suelo y evitaría la erosión de los campos de siembra y la retención de agua. El alto contenido de material orgánico de los biosólidos en estudio, al obtenerse como resultado una concentración promedio de 86,34% de material orgánico, junto con un máximo de 88,01% y un valor mínimo de 85,31%, aportará al suelo gran cantidad de nutrientes y otros compuestos que facilitarían el intercambio de estos en las raíces de la planta (Houot et al., 2002).

Cuadro 7. Macro y micronutrientes determinados en los lodos de la PTAR Los Tajos

Muestra	Nitrógeno Total Kjeldahl (±2,56mg/g)	Potasio (±0,18mg/g)	Fósforo (±0,12 mg/g)	Sodio (±0,36mg/g)
LLD-01TS	7,58	4,80	1,92	14,70
LLD-02TS	7,34	4,33	2,76	15,20
LLD-03TS	4,53	5,13	1,85	14,77
LLD-04TS	11,42	5,13	1,60	15,77
LLD-05TS	20,26	4,30	1,24	14,23
LLD-06TS	18,74	5,77	1,96	15,00
LLD-07TS	20,76	5,23	2,09	14,50
LLD-08TS	15,05	5,20	1,99	12,03
LLD-09TS	28,82	6,23	2,12	16,07
LLD-10TS	24,29	5,73	1,70	14,97
LLD-11TS	28,22	4,97	1,57	16,70
Promedio	17,00	5,17	1,89	14,90
Max	28,82	6,23	2,76	16,70
Min	4,53	4,30	1,24	12,03
SD	8,48	0,59	0,39	1,20

Tanto para los resultados de metales como para los resultados de micro y macronutrientes podemos observar que existen variaciones entre muestras. Esto se debe a un que la planta se encuentra operacionalmente al 20% de su capacidad caudal, generando que la producción de lodos sea muy lenta y aumentando los tiempos de retención de ellos en los digestores y por lo tanto su salida hacia los deshidratadores. Al contar con un tiempo de retención mucho

mayor al del diseño de la PTAR, cada muestra presentará características diferentes y esto se verá reflejado en los resultados de análisis.

4.1.3 Determinación de variables microbiológicas

Se realizó el conteo de huevecillos de helmintos en cada muestra y se encontró presencia de estos huevecillos en todas las muestras. El gráfico 2 muestra la tendencia en que se comportó la presencia de huevecillos de helmintos en las muestras. De esta manera, al tener evidencia de la presencia de huevecillos en los biosólidos usados como muestra de la PTAR Los Tajos, estos biosólidos no cumple con el Reglamento N° 39316-S Reglamento para el manejo y disposición final de lodos y biosólidos, ya que el límite máximo permitido para los biosólidos tipo A es de 1 huevecillo, mientras que en biosólidos tipo B es de 10 huevecillos.

Esta variable microbiológica es de alta importancia para garantizar la calidad de los lodos que se producen en la PTAR en caso de disposición final en suelos. Así mismo, la presencia de estos indica la prevalencia de la infección por estos parásitos en la población que descarga sus aguas residuales a la PTAR (Jiménez, 2007). Estos huevecillos pueden soportar hasta 12 meses en los lodos y se transfieren por cadena trófica a un nuevo huésped ya sea humano o animal. (Jiménez, 2007) reportó en México, muestras de lodos con números de hasta 177 ud/g de sólidos totales. Mientras que, en España, un país más desarrollado en temas de tratamiento y sanitización, Guzmán y Campos (Guzmán y Campos, 2001) reportaron concentraciones menores a 1 ud/10 g de sólido total en una matriz similar a la analizada. En el anexo 3 se encuentran documentadas microfotografías tomadas durante el análisis de estas muestras en las que se identificaron huevecillos de *Ascaris Lumbricoides*, *Trichiuris Trichiura* y *Uncinaria*.

En un estudio realizado por Amoah (Amoah et al., 2018) se recopiló información sobre reportes mundiales de la prevalencia de huevecillos de helmintos en aguas residuales y biosólidos utilizados en cultivos y paisajismo, y en el suelo. Las principales causas que menciona Amoah son:

1. El tratamiento de estas aguas y biosólidos: No todos los países cuentan con la tecnología para la eliminación de huevecillos. Es lógico pensar que esto tiene relación con el estado socioeconómico de cada país. Países en vías de desarrollo como Ghana, Siria, inclusive Costa Rica, que no cuentan con estas tecnologías por lo que la prevalencia de huevecillos es mucho mayor que en países desarrollados como los de la Unión Europea. De esta manera, Amoah ejemplifica este factor con el caso de Vietnam, país asiático en vías de desarrollo quienes reportar un conteo de entre 450 y 16000 huevecillos viables/L, mientras que Alemania no reporta ningún caso. (Amoah et al., 2018)
2. Técnicas de aplicación del agua residual a siembras: Menciona que la técnica de irrigación tiene un papel importante ya que es la manera en que se esparcen con mayor facilidad estos patógenos en el suelo, por lo que debe ser controlada.

Es importante mencionar que el sistema de digestión anaerobia con el que cuenta la PTAR Los Tajos, no elimina en su totalidad los huevecillos de helmintos. Por esta razón cabe señalar que existen métodos alternativos para la destrucción de estos huevecillos, que en este momento no se están utilizando en la PTAR Los Tajos. Esto debido a que al tratarse de una planta de tratamiento estatal, requiere de la apertura de una licitación pública para su desarrollo o la inversión institucional para adquirir este tipo de procesos y acoplarlos al sistema de tratamiento (Poder Judicial, 1996). Además, el destino por diseño de los biosólidos que se generan en la PTAR Los Tajos es a un relleno sanitario y dentro del marco legal y de reglamento, estos métodos de destrucción de huevecillos de helmintos no aplican para esta PTAR.

Algunos de estos métodos se enumeran a continuación:

1. Eliminación por vía ácida: Se utilizan ácidos con alto poder oxidante para degradar la capa lipídica y proteica del exterior del huevecillo. Se ha experimentado con ácido sulfúrico, perclórico, acético, propiónico, iso-butírico, n-butírico, iso-valérico y peracético, siendo este último el que generó mejores resultados (USEPA, 1999).
2. Fotocatálisis homogénea: Mediante un catalizador (generalmente hierro), la luz es absorbida. Estas especies que absorben los fotones generan una modificación química del sustrato, en este caso agua o lodos residuales. Esto genera un aumento en la cantidad de radicales hidroxilo. Este proceso, además se utiliza para la descomposición de otras especies como plaguicidas, compuestos fenólicos entre otros (García et al., 2008).
3. Fotocatálisis solar con TiO_2 : La reacción de fotocatálisis solar utiliza el dióxido de titanio como catalizador para generar una ruptura o división de la pared celular de forma inducida lo cual destruye las células bacterianas. Al mismo tiempo la generación de radicales hidroxilo daña y destruye el sistema reproductor de los helmintos por lo que su tasa de reproducción se verá altamente reducida. (Rojas et al., 2004)
4. Ozonización: es un mecanismo de oxidación o destrucción directa de la pared celular utilizando ozono, generando daños a ácidos nucleicos y ruptura de enlaces carbono-nitrógeno de las proteínas que componen el huevecillo, eliminándolo del sustrato (Escobar et al., 2014)

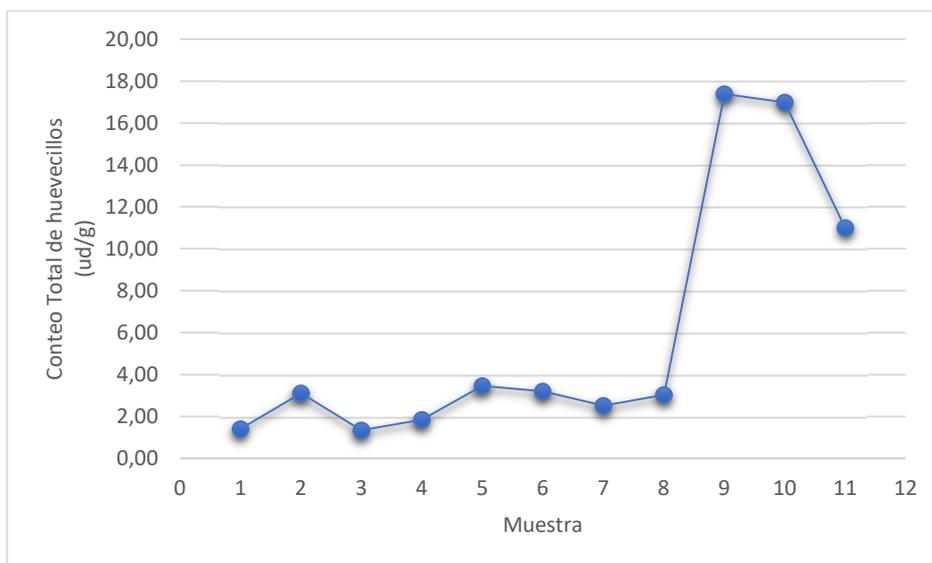


Gráfico 2. Gráfico de conteo total de huevecillos de helmintos en las muestras de lodos

Los resultados de recuento microbiológico reflejan que todas las muestras cumplen con los máximos permitidos establecidos en el Reglamento N° 39316-S para el manejo y disposición final de lodos y biosólidos (Poder Ejecutivo, 2015), a excepción de la muestra 11, la cual supera los 2×10^6 UFC/g como se observa en el gráfico 3, siendo este valor superior al límite máximo permitido para un lodo de tipo ordinario de tipo B para disposición en suelos.

Los análisis microbiológicos revelaron que, aunque se cuente con un proceso de digestión anaeróbica para propiciar la inocuidad de los lodos, estos siempre tendrán presencia de coliformes fecales, aunque siempre por debajo del máximo permitido por el Reglamento Nacional que rige sobre el manejo y disposición de lodos (Poder Ejecutivo, 2015) para lodos tipo B. Sin embargo, para la disposición de estos lodos en relleno sanitario, tal es el caso de la PTAR Los Tajos, el reglamento antes mencionado no tiene ningún parámetro y por lo tanto los coliformes fecales y los huevecillos de helmintos no son solicitados para este tipo de disposición.

Los resultados de las muestras recolectadas mostraron que solo un 18,2% de las muestras presentaron concentraciones de coliformes mayores a los valores permitidos para su disposición y uso en suelos tanto para biosólidos tipos A como para tipo B.

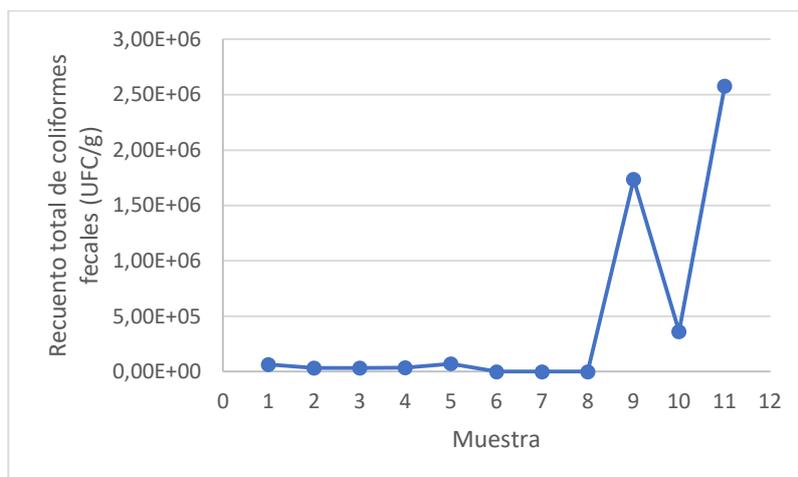


Gráfico 3. Recuento total de coliformes fecales en las muestras de lodos de la PTAR Los Tajos.

Como podemos ver en los gráficos 2 y 3, las últimas 3 muestras presentan un crecimiento anormal en la presencia de coliformes fecales y huevecillos de helmintos. Esto puede ser causado debido a que, igual con los análisis fisicoquímicos, los resultados se ven afectados por el tiempo de retención de los lodos dentro de los digestores, donde este tiempo depende de la cantidad de lodo que es purgado de los sedimentadores primarios y posteriormente alimentado a los digestores, las variaciones en estos tiempos de retención pudieron provocar que el tiempo en estos casos fuera menor afectando el proceso de digestión anaerobia y permitiendo la mayor permanencia de estos patógenos en los lodos. Sin embargo, se recomienda ampliar este estudio determinando la cantidad de huevecillos de helmintos en la entrada al digestor anaerobio de lodos, dentro del digestor y en la salida contemplando los tiempos de retención con el fin de evaluar la eficiencia de este tipo de tratamiento en la remoción de huevecillos de helmintos.

4.1.4 Determinación de toxicidad por crecimiento controlado

Normalmente en el campo de ecotoxicología no se realizan estudios fitotóxicos utilizando plantas terrestres como el rábano. Sin embargo, esto tiene sus ventajas, ya que se requiere menos tiempo y se tiene costo económico menor para realizar el estudio. Además, se tiene una ventaja en las condiciones para realizar las pruebas ya que no se requiere aireación y no se requiere ajuste de pH previo (Iannacone y Alvariño, 2005)

En el gráfico 4 se muestran los resultados del conteo de germinación de semillas en los contenedores, los cuales son macetas de cartón biodegradables, que fueron preparados con una mezcla de tierra-lodo en las proporciones anteriormente mencionadas. Esta mezcla tierra-lodo se colocó de manera que recibiera continuamente luz solar entre las 8 am y las 11 am.

No se agregó más agua que la que ya contenía la mezcla (Ayres et al., 1996). Se obtuvo un promedio de 70% de germinación de semillas. Los resultados del conteo de germinación en cada uno de los contenedores se encuentran tabulados en el cuadro 8 y el anexo 2 muestra la secuencia de fotografías tomadas como registro de la germinación de las semillas en cada contenedor y los insumos utilizados para estas pruebas.

Los contenedores 1 y 7 son los controles los cuales corresponden al 0% lodo y al 100% lodo. Así al variar el porcentaje de lodo utilizado se determina que las condiciones para que las semillas germinen si se ven afectadas donde en el contenedor 1 germinaron todas las semillas mientras que en el contenedor 7 no germinó ninguna. Como podemos observar en el cuadro 8, la pequeña variación de un 10% de lodos entre el contenedor 2 y 3 no generó cambio en la germinación de semillas, teniendo un conteo de germinación de 8 semillas por contenedor. Esto cambia al pasar del contenedor 3 al 4 donde, con un aumento de 10% de lodos se dio la pequeña diferencia de 1 semilla sin germinar pasando de 8 a 7 semillas germinadas. Estos pequeños cambios en la germinación se dan cada 20% en aumento de uso del lodo, por lo que esta tendencia se repite entre los contenedores 5 y 6.

Cuadro 8. Conteo de germinación para cada contenedor de pruebas de crecimiento y toxicidad.

Contenedor	Proporción tierra/lodo (%)	Masas (g)	Conteo de germinación
1	100-0	150	10
2	90-10	135-15	8
3	80-20	120-30	8
4	70-30	105-45	7
5	60-40	90-60	7
6	50-50	75-75	6
7	0-100	150	0
Promedio			7

En cuanto a los efectos toxicológicos en el crecimiento vegetal cabe destacar:

- Que la producción de estos biosólidos en la PTAR Los Tajos cumple los parámetros fisicoquímicos solicitados por el reglamento.
- No cumple con los parámetros microbiológicos en los cuales se superan los límites establecidos tanto para biosólidos tipo A como para biosólidos tipo B.
- Son biosólidos de alta densidad y por sus características morfológicas, (Bouriou et al., 2015) en altas cantidades para su uso como acondicionador de suelos generaría una inhibición en el crecimiento vegetal y eventual muerte de los sembradíos.

Las características morfológicas de un suelo o en este caso, una muestra de lodo, son aquellos atributos que se puede observar y determinar con nuestros sentidos (vista y tacto). Estos lodos

se muestran como un tipo de barro oscuro y denso y con una textura al tacto similar a la arcilla roja, la cual tiene una porosidad muy baja lo que impide la oxigenación de suelos e inhibe el crecimiento vegetal pero facilita la encapsulación de agua (López y López, 1990). Esto podemos observarlo según nos los muestra figura 7, donde queda evidenciado que a mayor cantidad de este biosólido que se utilicen de forma directa en la siembra, menor será el crecimiento vegetal.

La elección del rábano (*Raphanus sativus*) como objeto de observación para crecimiento vegetal se debe a que es una raíz comestible y de consumo directo (no requiere cocción previa al consumo) de la familia de pantas vasculares como lo son la zanahoria y el pepino, puede cultivarse con gran facilidad en diferentes tipos de suelos donde no es necesario la regulación de pH y es un indicador de la presencia de elementos fitotóxicos en el agua y en el suelo, ya que su crecimiento y el de sus raíces se ve afectado por la presencia de estos elementos (Bakhsh y Hassan, 2005).

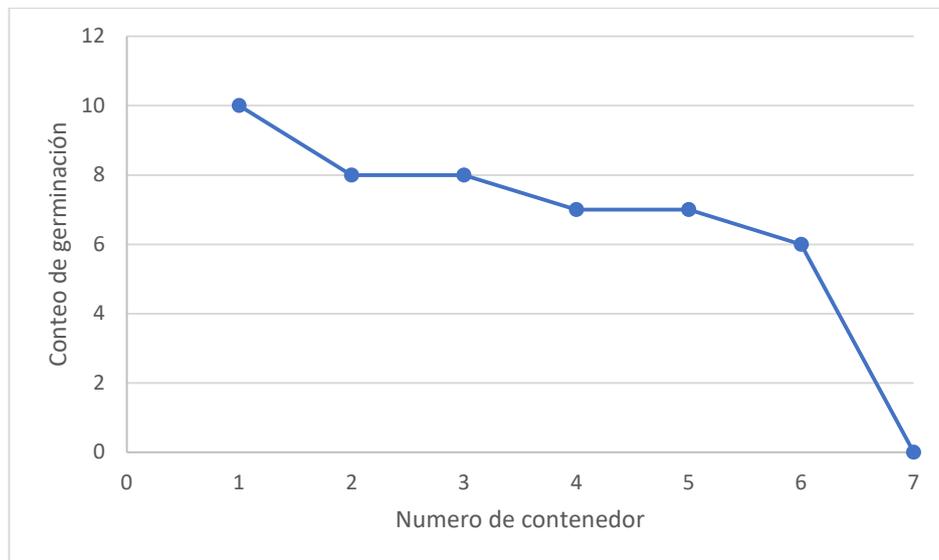


Gráfico 4. Conteo de germinación de semillas de *Raphanus sativus* para la determinación de la toxicidad de los lodos de la PTAR Los Tajos.

5. Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones.

Conociendo el resultado de los análisis se concluye que:

- A partir de los análisis fisicoquímicos para la caracterización de lodos provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos; determinación cuantitativa de oligoelementos aluminio (Al), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn) y zinc (Zn), los metales analizados no constituyen riesgo toxicológico y contribuyen como potenciadores del suelo en sus formas iónicas. Con respecto al análisis de los metales: arsénico (As), selenio (Se), níquel (Ni), cromo (Cr), mercurio (Hg), plomo (Pb), cadmio (Cd) y antimonio (Sb), todos muestran una concentración aceptable para uso agrícola y aplicación sobre el suelo de acuerdo con el reglamento RTCR 485:2016 Reglamento de sustancias químicas, fertilizantes y enmiendas para uso agrícola, y en concordancia también con los autores Romero, 2004 y Khan 2014. también se establece que los parámetros humedad, pH, macronutrientes analizados (N y P), los micronutrientes (Na y K) y el porcentaje de material orgánico total se encuentran en valores adecuados por el RTCR 485:2016.
- Se determina la presencia de huevecillos en los biosólidos usados como muestra de la PTAR Los Tajos, estos biosólidos no cumple con el Reglamento N° 39316-S: *Reglamento para el manejo y disposición final de lodos y biosólidos*, ya que el límite máximo permitido para los biosólidos tipo A es de 1 huevecillo, mientras que en biosólidos tipo B es de 10 huevecillos. También se establece que los parámetros humedad y pH se encuentran en valores adecuados en el cumplimiento del reglamento RTCR 485:2016. Aunque existe presencia de coliformes fecales, se encuentran por debajo del máximo permitido por el Reglamento Nacional que rige sobre el manejo y disposición de lodos (Poder Ejecutivo, 2015)
- Las pruebas de siembra, crecimiento y toxicidad son satisfactorias con un 70% de germinación de semillas, para ensayos con diversas proporciones que van de 0% lodos a 100 lodos, lo cual implica que el tratamiento de lodos genera un biosólido de gran potencial nutricional para el suelo, siempre y cuando este reciba un tratamiento de compostaje posterior a la deshidratación, ya que los lodos por sí mismos tienen una alta densidad que inhibe el crecimiento de la planta.

Se recomienda incluir entre los parámetros establecidos para el control de calidad, la concentración de metales pesados en los lodos, para que además de determinar su concentración, se obtenga información de las posibles fuentes de contaminación por metales en los cuerpos de agua y en el alcantarillado sanitario, ya que estos metales son producto en

su mayoría, de procesos industriales y donde sus desechos terminan en algún cuerpo de agua, vulnerando la salud pública y ambiental. Así mismo es recomendable, generar un listado de los procesos industriales que se encuentren conectados al alcantarillado sanitario y la caracterización de las aguas de lluvia que llegan a la PTAR por conexiones pluviales ilícitas que podrían incidir en el arrastre de residuos de algunos procesos industriales.

Como recomendación para solucionar el problema de la alta densidad de los lodos y la inhibición de germinación de semillas, es primordial contar con un sistema de compostaje o post tratamiento para estos lodos y así convertirlos en un sustrato más “amigable” para su uso en suelos de tipo agrícola. Esto permitirá aprovechar un insumo altamente rico en nutrientes sin el riesgo de contaminar el suelo o causar la pérdida de semillas y además disminuiría el riesgo de propagación de patógenos y aumento de vectores de infección.

Debido a la presencia en todas las muestras de huevecillos de helmintos, lo cual significa que no se está cumpliendo con los parámetros de reglamento para disposición en suelo, se recomienda ampliar este estudio determinando la cantidad de huevecillos de helmintos en la entrada del digestor anaerobio de lodos, dentro del digestor y en la salida contemplando los tiempos de retención con el fin de evaluar la eficiencia de este tipo de tratamiento en la remoción de huevecillos de helmintos. Y además, se sugiere implementar técnicas de eliminación alternativas utilizando químicos o radiación para asegurar la eliminación de estos parásitos como fue mencionado anteriormente.

También, se recomienda evaluar la importancia de la inclusión de parámetros como los metales pesados y los macro y micro nutrientes en el actual reglamento nacional que rige sobre el manejo y disposición de lodos provenientes de plantas de tratamiento, ya que los valores máximos permisibles de otros reglamentos complementarios como el reglamento de fertilizantes y enmiendas agrícolas del Ministerio de Agricultura y Ganadería o el reglamento de sustancias tóxicas industriales, no precisamente son los mismos para el uso que se visualiza en este proyecto.

6. Capítulo VI. Referencias bibliográficas.

1. Agencia de Protección Ambiental. A Plain English Guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule. (1994).
2. Ahmad, T., Ahmad, K., & Alam, M. (2016). Characterization of water treatment plant's sludge and its safe disposal options. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 950-955.
3. Amoah, I. D., Adegoke, A. A., & Stenström, T. A. (2018). Soil-transmitted helminth infections associated with wastewater and sludge reuse: a review of current evidence. *Tropical Medicine & International Health*, 23(7), 692-703.
4. Alvarenga, P., Palma, P., Mourinha, C., Farto, M., Dôres, J., Patanita, M., Cunha-Queda, C., Natal-da-Luz, T., Renaud, M., & Sousa, J. P. (2017). Recycling organic wastes to agricultural land as a way to improve its quality: A field study to evaluate benefits and risks. *Waste Management*, 61, 582–592.
5. Alvarenga, P., Mourinha, C., Farto, M., Santos, T., Palma, P., Sengo, J., Morais, M. C., & Cunha-Queda, C. (2015). Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors. *Waste Management*.
6. Alexander, P.D., Alloway, B. J., Dourado, A.M., 2006. Genotypic variations in the accumulation of Cd, Cu, Pb and Zn exhibited by six commonly grown vegetables. *Environmental Pollution* 144: 736-745.
7. AyA. (2009). Programa Nacional de Manejo Adecuado de las Aguas Residuales Costa Rica 2009-2015. 46.

8. Ayres, M., Mara, D. D., & M, R. (1996). Analysis of wastewater for use in agriculture techniques. World Health.
9. Bakhsh, K., Hassan, S., 2005. Use of sewage water for radish cultivation: A case study of Punjab. *Pakistan Journal of Agricultural Social Sciences* 4: 322-326
10. Bouriou, M., Alaoui-Sehmer, L., Laffray, X., Benbrahim, M., Aleya, L., & Alaoui-Sossé, B. (2015). Sewage sludge fertilization in larch seedlings: Effects on trace metal accumulation and growth performance. *Ecological Engineering*, 77, 216–224.
11. Bowman, R.A., Cole, C.V. (1978). Transformations of organic phosphorus substrates in soils as evaluated by NaCO_3 extraction. *Soil Science*, 125(1).
12. Campillo, R., & Sadzawka, A. (2006). La acidificación de los suelos. Origen y mecanismos involucrados. *Serie Actas-Instituto de Investigaciones Agropecuarias*.
13. Calow, P. 1993. Handbook of ecotoxicology. Vol. I. 478 p. Blackwell Science Ltd., London, England
14. Christiana, O. (2012). Comparison of Digestion Methods for the Determination of Metal Levels in Soils in Itakpe, Kogi State, Nigeria. *Int. J. Pure Appl. Sci. Technol*, 13(2), 42–48.
15. Ciešlik, B. M., Namiešnik, J., & Konieczka, P. (2015). Review of sewage sludge management: Standards, regulations and analytical methods. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 90, pp. 1–15).
16. Escobar, S., Sánchez, L., Nájera, H., Gutiérrez, J., & Neftalí, M. (2014). Destrucción de huevos de helminto Mediante procesos no convencionales. *Cienc. Desarro*, 40, 60-66.

17. Elloumi, N., Belhaj, D., Jerbi, B., Zouari, M., & Kallel, M. (2016). Effects of sewage sludge on bio-accumulation of heavy metals in tomato seedlings. *Spanish journal of agricultural research*, 14(4), 17.
18. Fair, G. M., Okun, D. A., & Geyer, J. C. (1999). *Ingeniería sanitaria y de aguas residuales: Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales*. Limusa.
19. Federation, W. E., & Aph Association. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA, 21.
20. FuturEnviro. (2015). *Los Tajos wastewater treatment plant, Costa Rica*. FuturENVIRO.
21. García, J. L., Mejía, L., Bandala, E., Corona, B. (2008). “Inactivación de huevos de helminto mediante fotocatalisis homogénea”. *Aquaforum*, núm. 49, año. 12, pp. 14-18.
22. Garzón Gutiérrez, M. J. (2021). *Estudio de la bioadsorción de níquel con adsorbente de maíz en aguas residuales provenientes de una industria de galvanotécnica*.
23. González, M., Segoviano, J., García, J., González, M., Segoviano, J., & García, J. (2014). *Concentración total y biodisponibilidad de plomo en lodos residuales provenientes de una PTAR urbano-municipal del estado de Guanajuato*. 73–80.
24. Guzmán C, Campos C. *Indicadores de contaminación fecal en biosólidos aplicados en agricultura*. Universitas Scientiarum. 2001.
25. Herrera Murillo, J. (2017). *Uso y estado de los recursos: recurso hídrico*. Informe Estado de La Nación En Desarrollo Humano Sostenible 2017, 32.

26. Houot, S., Clergeot, D., Michelin, J., Francou, C., Bourgeois, S., Caria, G., & Ciesielski, H. (2002). Agronomic Value and Environmental Impacts of Urban Composts Used in Agriculture. *Microbiology of Composting* (pp. 457–472).
27. Hue, N. V, & Silva, J. A. (2000). Organic Soil Amendments for Sustainable Agriculture: Organic Sources of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium. *Plant Nutrition in Hawaiss’s Soil for Tropical and Subtropical Agriculture*, 133–144.
28. Iannacone, O., Alvarino F., L. 2005. Efecto ecotoxicológico de tres metales pesados sobre el crecimiento radicular de cuatro plantas vasculares. *Agricultura Técnica (Chile)* 65(2):198-203
29. Jimenez B. Helminth ova control in sludge: a review. *Water Sci Technol.* 2007;56(9):147- 55.
30. Khan, Q, Akhtar, F, Jamil, M, Sayal, O, Mirza, N, Mubarak, H. (2014). Studies on different concentration of lead (Pb) and sewage water on Pb uptake and growth of Radish (*Raphanus sativus*). *Eurasian Journal of Soil Science*, 3 (2), 138-143.
31. Liebig, MA; GE Varvel; JW Doran & B J Wienhold. 2002. Crop sequence and nitrogen fertilization effects on soil properties in the western corn belt. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 596-601.
32. LNA, (2021). AyA-PT-020-5 Muestreo compuesto de agua, aguas residuales, agua de mar y lodos.
33. LNA, (2022). AyA-PT-028-4 Análisis de fósforo total.
34. LNA, (2022). AyA-PT-031-5 Análisis de nitrógeno total Kjeldalh, amoniacal y orgánico.
35. LNA, (2021). AyA-PT-035-2 Análisis de pH

36. LNA, (2021). AyA-PT-042-3 Analisis de sodio y potasio por espectrometría de llama.
37. LNA, (2021). AyA-PT-100-2 Análisis de metales por plasma de acoplamiento inducido con detector de masas.
38. LNA, (2022). AyA-PT-108-1 Análisis de coliformes fecales totales en lodos.
39. LNA, (2021). AyA-PT-066-1 Análisis de materia seca, volátil, humedad total y cenizas.
40. LNA, (2022). AyA-PT-107-1 Análisis de huevecillos de helmintos en lodos.
41. López Ritas, J., López Mélida, J. (1990). El diagnóstico de suelos y plantas: métodos de campo y laboratorio. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
42. Lopez, S., Ramirez, E., Cardoso, L., Mijaylova, P., & Moeller, G. (2015). Tratamiento De Lodos Residuales Municipales Con Un Proceso Aerobio-Termofílico. Instituto Mexicano de Tecnología Del Agua, 73, 1–16.
43. Mahler, R.L. 2003. General overview of nutrition for field and container crops. In: Riley, L. E.; Dumroese, R. K.; Landis, T. D. Tech Coords. National Proceeding: Forest and Conservation Nursery Associations. 2003 June 9-12; Coeur d`Alene, ID; and 2003 July 14-17; Springfield, IL. Proc. RMRS-P-33
44. Meghari, A. R., & Omar, R. K. (2017). Physicochemical Characterization of Sewage Sludge of Gaza Wastewater Treatment Plant for Agricultural Utilization. IUG Journal of Natural Studies.
45. McLaughlin, M. J. (1984). Land application of sewage sludge. South African Journal of Plant and Soil, 1(1), 21–29.

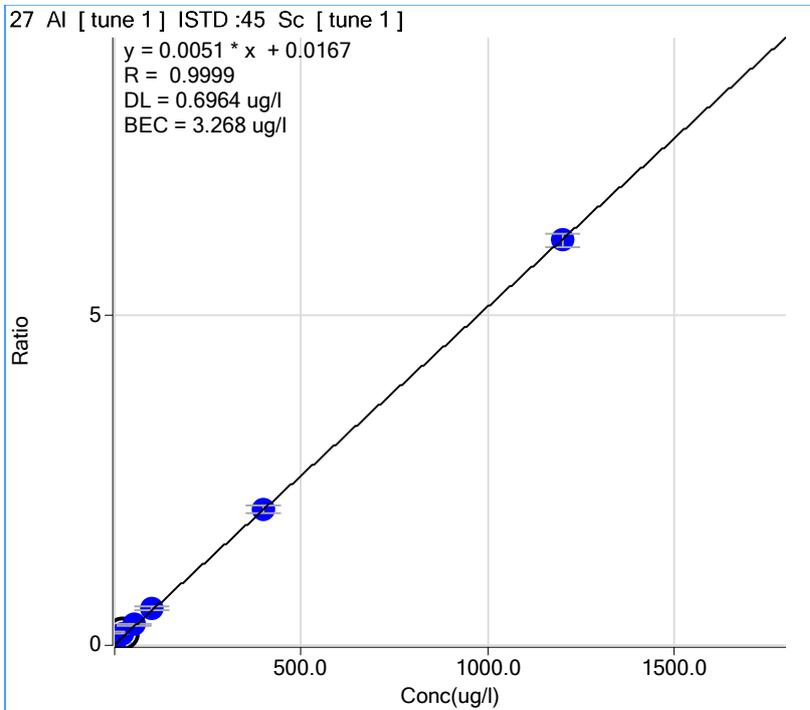
46. Méndez, J. P., Ramírez, C. A. G., Gutiérrez, A. D. R., & García, F. P. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29-44.
47. Morera, Mauricio. Diseño de un proceso de secado para los lodos centrifugados provenientes del sistema de tratamiento de lodos de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Los Tajos. (2018).
48. Ospina, F., Rodríguez, A., & Gonzales, J. (2012). Comparison of the regulations for the management of sludge from waste water in Argentina, Chile and Colombia. *Revista UMNG*, 33(2), 227–238.
49. PTAR Los Tajos (2017). Reporte de sistema de control automatizado y adquisición de datos (SCADA). Technical report, AyA.
50. Poder Ejecutivo (1996). Ley 7494. Ley de Contratación Administrativa, La Gaceta, 120.
51. Poder Ejecutivo (2015). Reglamento para el Manejo y Disposición Final de Lodos y Biosólidos. La Gaceta, 234.
52. Poder Ejecutivo (2016). RTCR 485:2016, R. Sustancias químicas. Fertilizantes y enmiendas para uso agrícola. Tolerancias y límites permitidos para la concentración de los elementos nutritivos, metales pesados e impurezas. Ministerio de Agricultura y Ganadería. La Gaceta, 178
53. Rojas, V. M., Orta de Velásquez, M., Vaca, M., Franco, V. (2004). “Ozonation by-Products Issue from The Destruction of Microorganisms Present in Wastewaters Treated for Reuse”. *Water Science & Technology*, vol. 50, núm. 2, pp. 187-193.

54. Romero Rojas, J. A. (2004). Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño. Bogotá, CO, Escuela Colombiana de Ingenieros.
55. Ruiz, F. (2012). Gestión de las Excretas y Aguas Residuales en Costa Rica. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. 1–64.
56. Schulz, R., & Römheld, V. (1997). Recycling of municipal and industrial organic wastes in agriculture: Benefits, limitations, and means of improvement. *Soil Science and Plant Nutrition*, 43(SPEC. ISS.), 1051–1056.
57. SEMARNAT. (2003). Norma Oficial Mexicana para la Protección Ambiental. Lodos y Biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Nom-004-Semarnat-2002. *Diario Oficial*, 66.
58. Tisdale, S., & Werner, N. (1991). Fertilidad de los Suelos y Fertilizantes (Vol. 17). UTEHA.
59. US EPA. Folleto Informativo de tecnología de aguas residuales: desinfección con ozono. Office of Water, Washington, D. C. EPA 832-F-99-063. Septiembre, pp 1-9. (1999).
60. Valderrama, A. R. (2013). Biodegradación De Residuos Sólidos Agropecuarios Y Uso Del Bioabono Como Acondicionador Del Suelo. Artículo, 1–51.
61. Valdez, E., & Vázquez, A. (2003). Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. Fundación Ica, AC México DF, México. 341p.
62. WHO (2006). Safe use of wastewater, excreta and greywater guidelines. Volume 2: wastewater use in agriculture. *World Health*, II, 204.

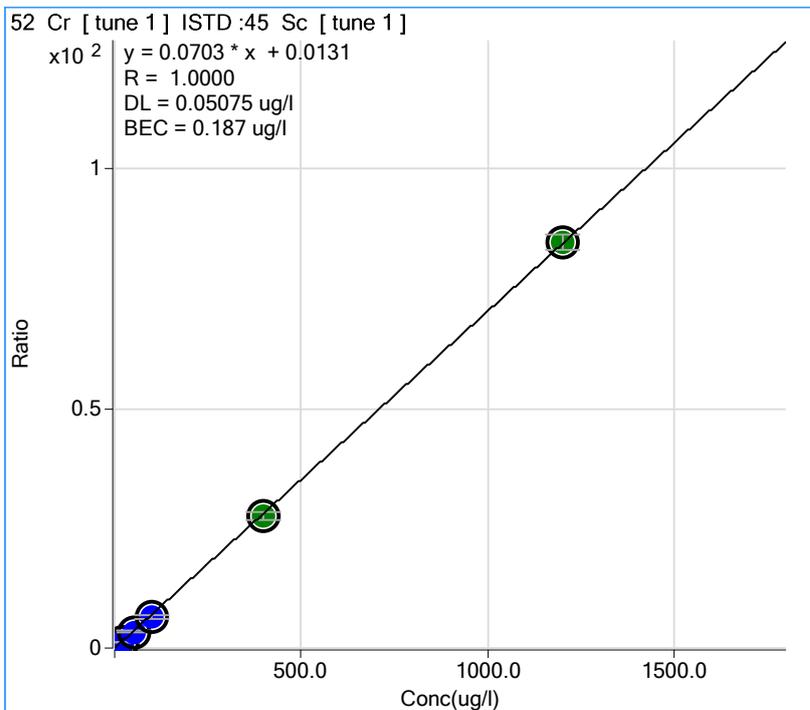
Anexos.

Anexo 1. Curvas de calibración de mezcla de metales en ICP-MS.

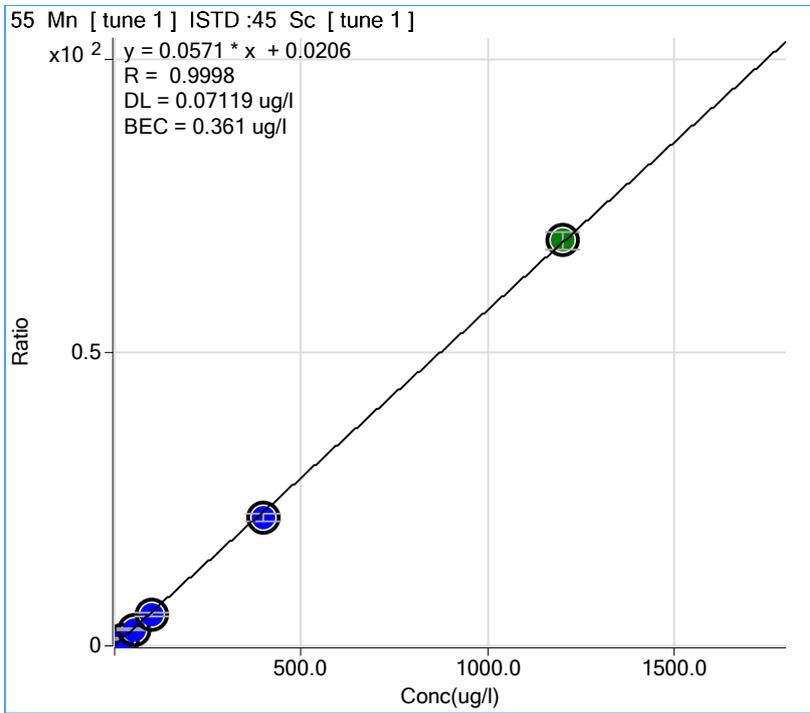
Anexo 1.1 Curva de calibración para aluminio



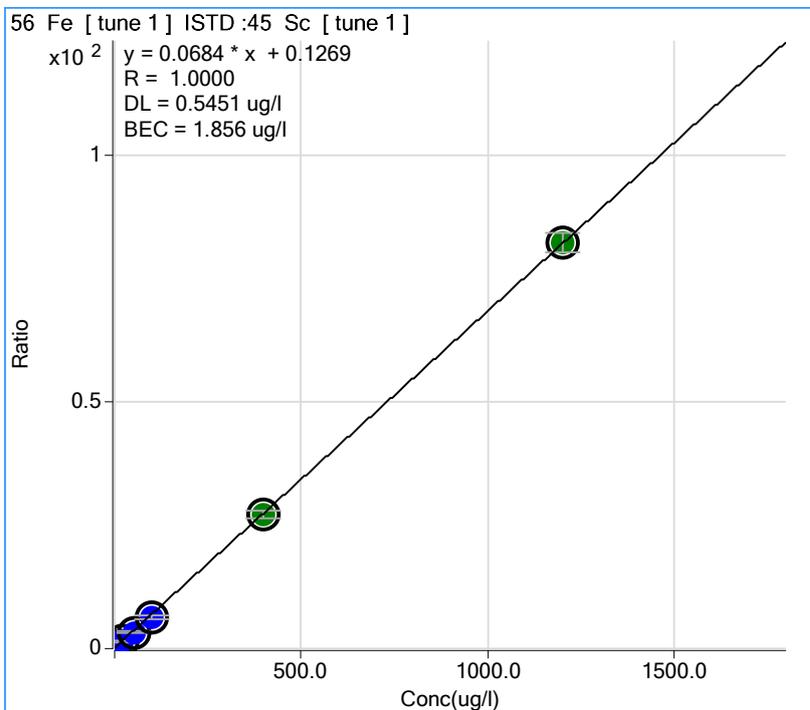
Anexo 1.2 Curva de calibración para cromo



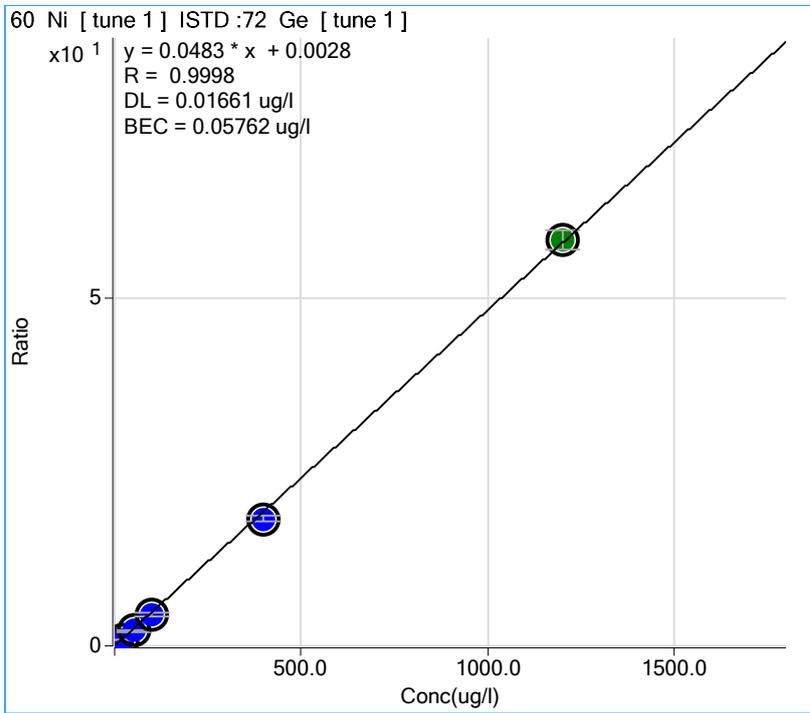
Anexo 1.3 Curva de calibración para manganeso



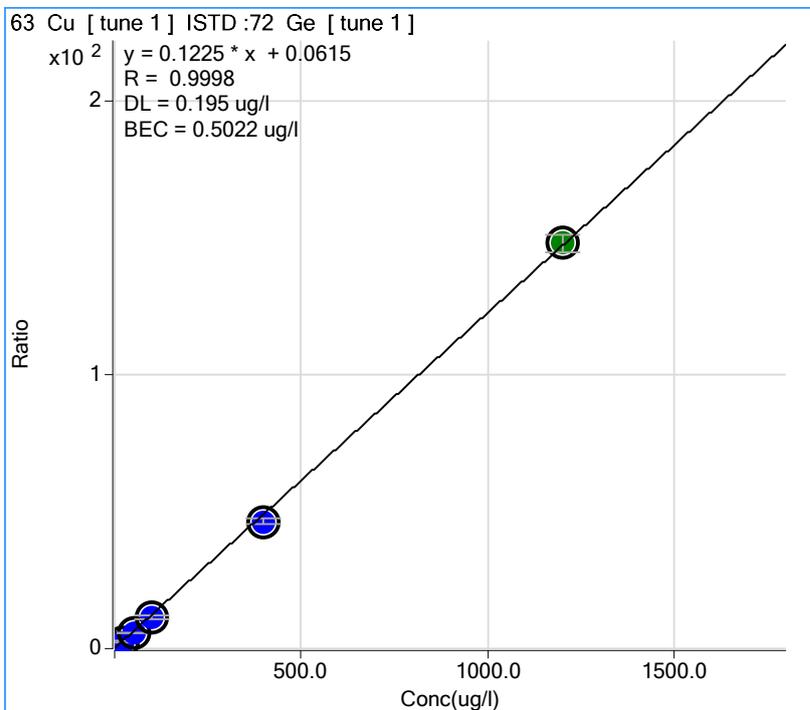
Anexo 1.4 Curva de calibración para hierro



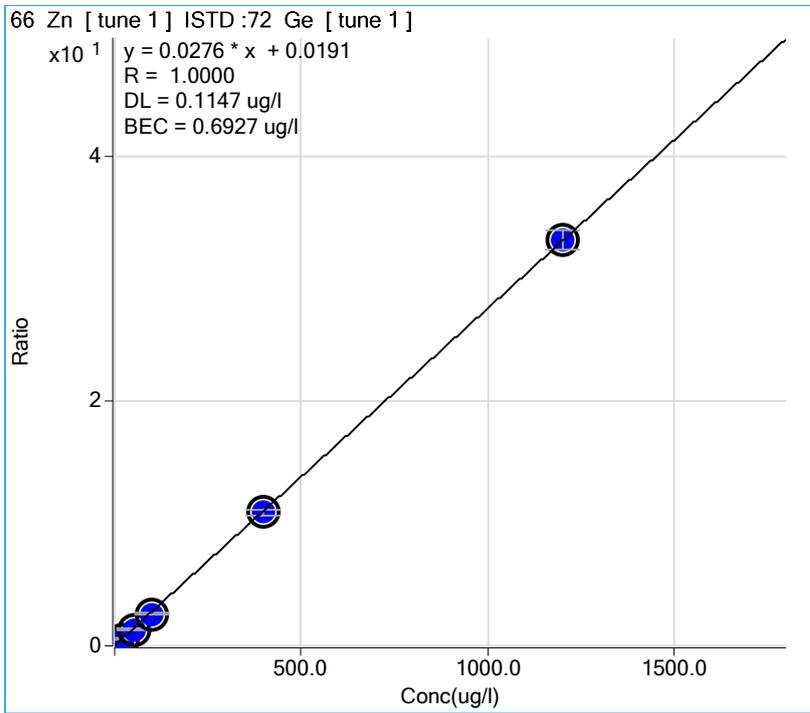
Anexo 1.5 Curva de calibración para níquel



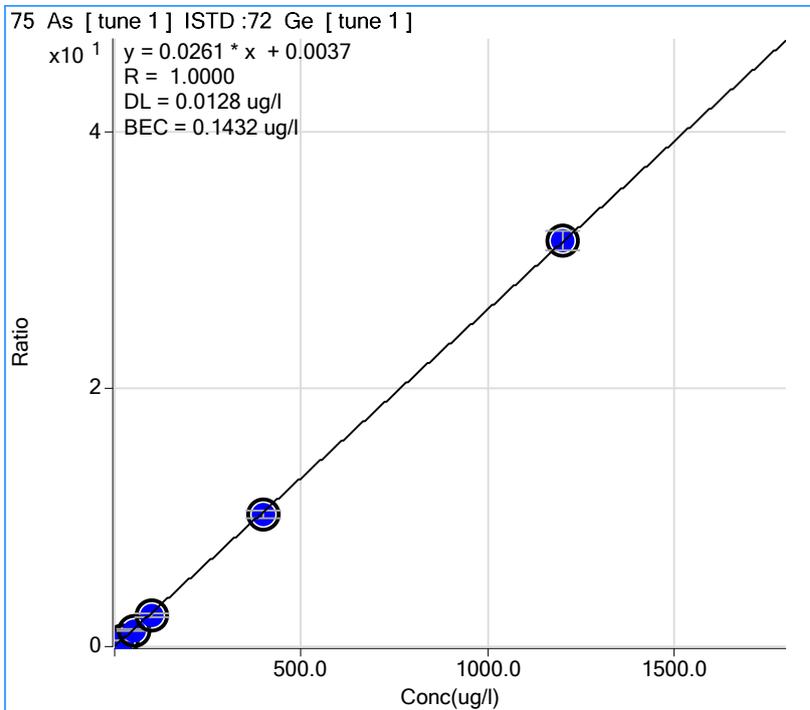
Anexo 1.6 Curva de calibración para cobre



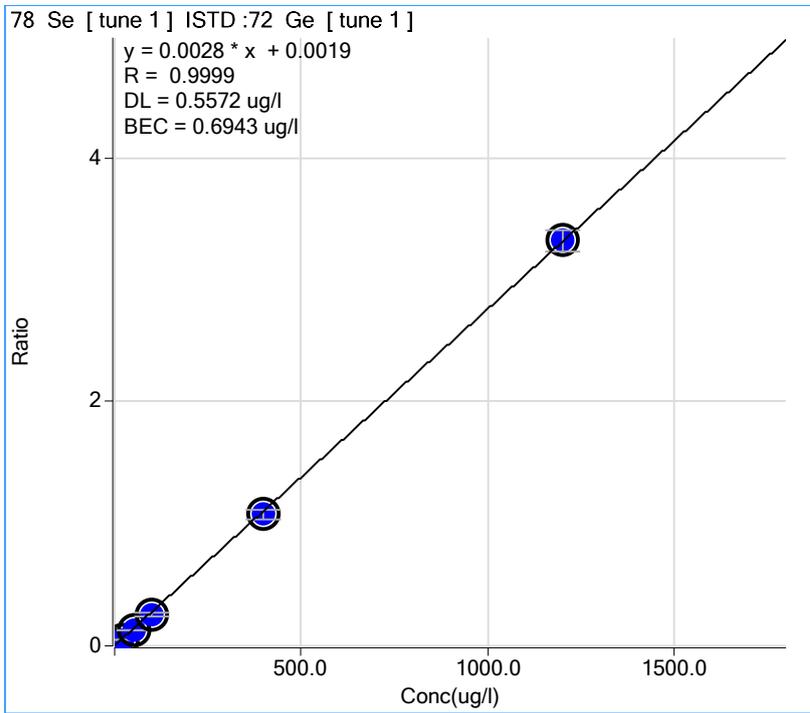
Anexos 1.7 Curva de calibración para zinc



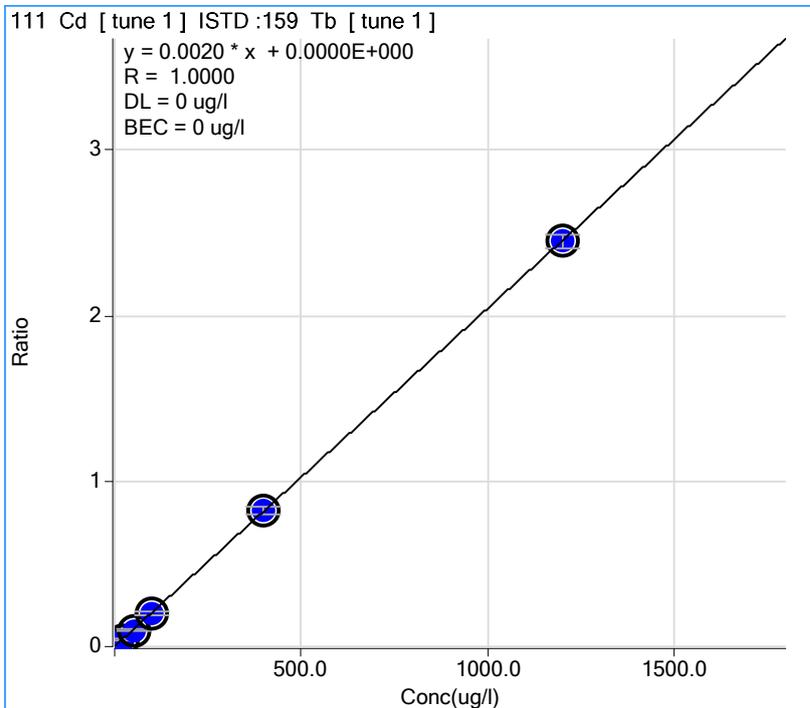
Anexo 1.8 Curva de calibración para arsénico



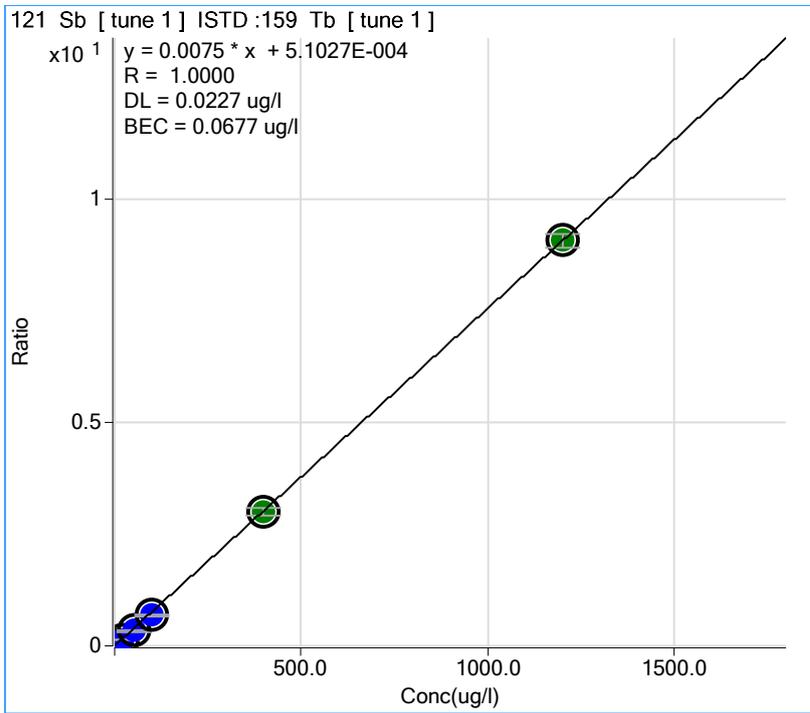
Anexo 1.9 Curva de calibración para selenio



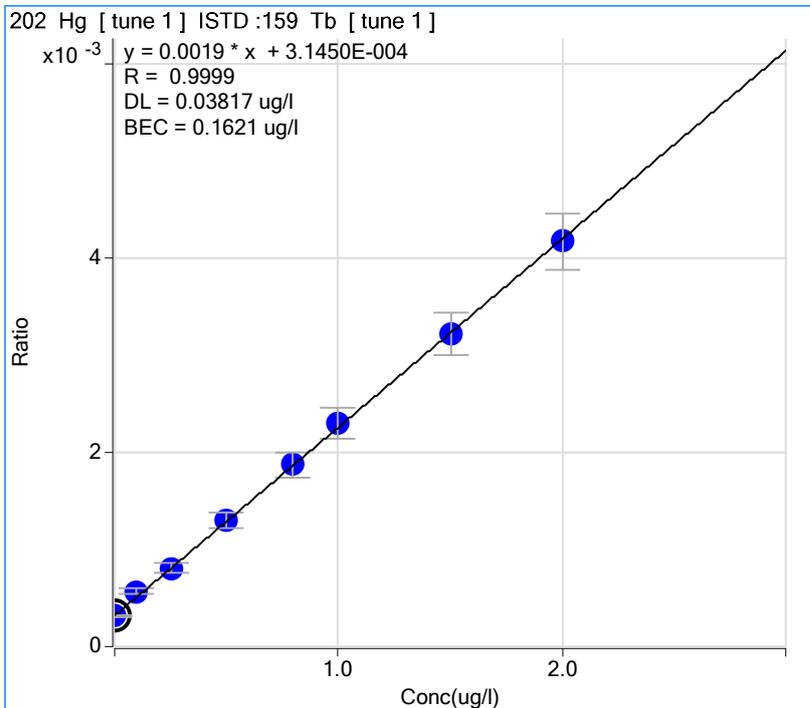
Anexo 1.10 Curva de calibración para cadmio



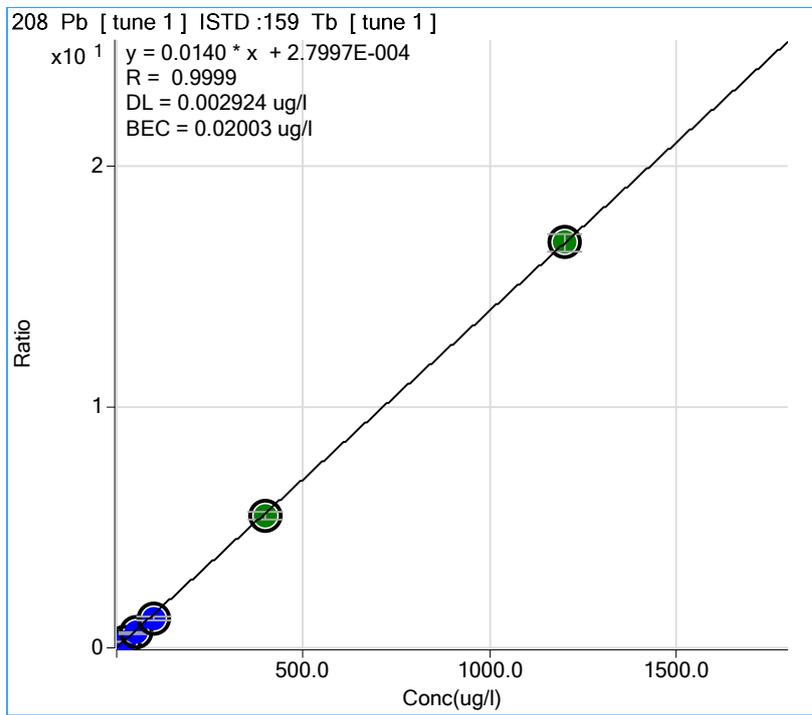
Anexo 1.11 Curva de calibración para antimonio



Anexo 1.12 Curva de calibración para mercurio



Anexo 1.13 Curva de calibración para plomo



Anexo 2. Pruebas de crecimientos vegetal y toxicidad

Anexo 2.1 Secuencia de fotografías registro del crecimiento de la muestra vegetal.

Inicio del experimento. Día 1.



Día 2.



Día 3



Día 4



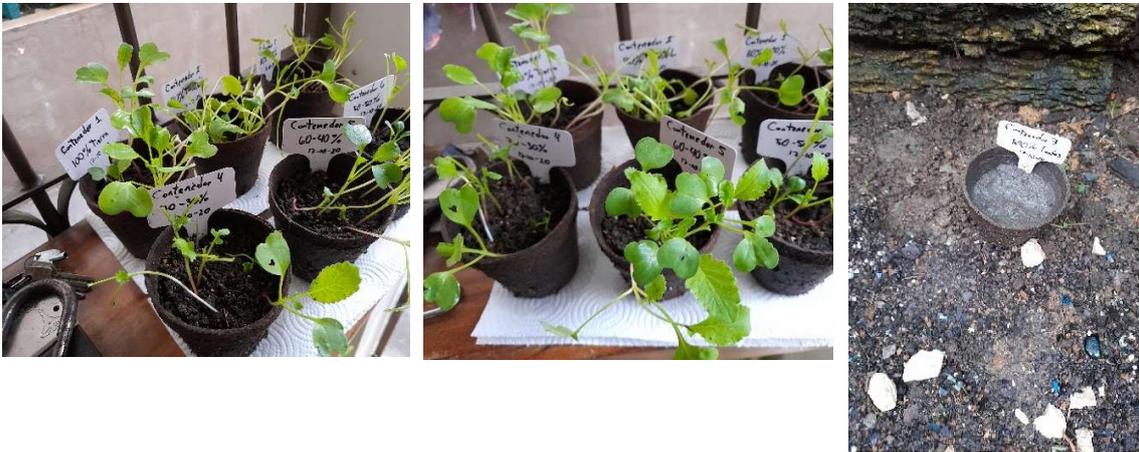
Día 5



Día 6



Final del experimento. Día 7



Insumos utilizados en pruebas de toxicidad vegetal.



Anexo 3. Microfotografías de la determinación de huevecillos de helmintos.

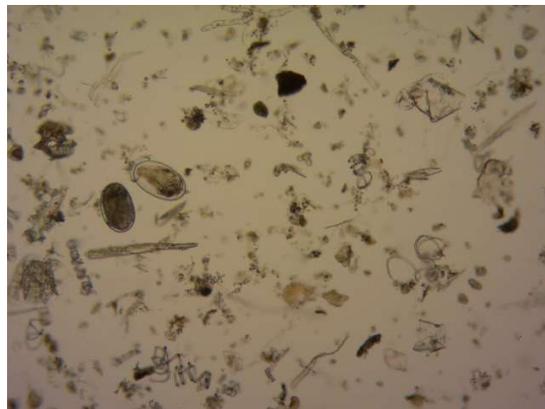
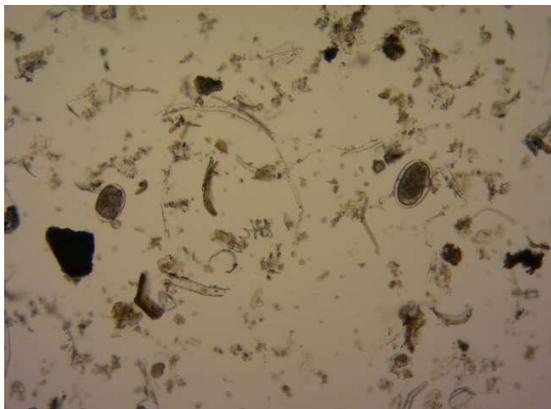
Anexo 3.1 *Ascaris lumbricoides*



Anexo 3.2 *Trichiuris Trichiura*



Anexo 3.3 Uncinaria



Anexo 4. Concentración de metales totales analizados por el método de ICP-MS en lodos obtenidos en la PTAR Los Tajos.

	Al	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Sb	Hg	Pb
Muestra 1: LLD-01TS													
M1	521,9	0,5	3,2	286,7	0,7	33,9	36,1	0	0,2	0,1	0	0,16	1,3
M2	547,2	0,8	3,5	304,5	0,6	3,5	53,4	0	0,1	0,1	0	0,18	1,3
M3	553,8	0,5	3,5	297,9	0,5	3,4	101,6	0	0,1	0,1	0	0,08	1,9
Promedio	540,97	0,60	3,40	296,37	0,60	13,60	63,70	0,00	0,13	0,10	0,00	0,14	1,50
Desviación estándar	16,84	0,17	0,17	9,00	0,10	17,58	33,94	0,00	0,06	0,00	0,00	0,05	0,35
Valor mínimo	521,90	0,50	3,20	286,70	0,50	3,40	36,10	0,00	0,10	0,10	0,00	0,08	1,30
Valor máximo	553,80	0,80	3,50	304,50	0,70	33,90	101,60	0,00	0,20	0,10	0,00	0,18	1,90
Muestra 2: LLD-02TS													
M1	319,7	0,3	2,3	193,5	0,6	5	36,4	0	0,1	0,1	0	0,01	1,3
M2	386	0,6	2,7	227,9	0,6	6,3	39,8	0	0	0	0	0,02	1
M3	360,8	0,3	4,7	214,8	0,4	2,5	42,5	0	0	0	0	0,11	1,1
Promedio	355,50	0,40	3,23	212,07	0,53	4,60	39,57	0,00	0,03	0,03	0,00	0,05	1,13
Desviación estándar	33,47	0,17	1,29	17,36	0,12	1,93	3,06	0,00	0,06	0,06	0,00	0,06	0,15
Valor mínimo	319,70	0,30	2,30	193,50	0,40	2,50	36,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	1,00
Valor máximo	386,00	0,60	4,70	227,90	0,60	6,30	42,50	0,00	0,10	0,10	0,00	0,11	1,30
Muestra 3: LLD-03TS													
M1	437,2	0,5	3,3	259	0,8	3,9	52,6	0	0	0	0	0	2,2
M2	386,3	0,4	6,3	924,4	0,9	3,7	225,5	0,7	0,1	0	0	0	1,7
M3	423,2	0,4	3	250,5	0,6	3,3	50,8	0	0	0	0	0,81	2
Promedio	415,57	0,43	4,20	477,97	0,77	3,63	109,63	0,23	0,03	0,00	0,00	0,27	1,97
Desviación estándar	26,29	0,06	1,82	386,65	0,15	0,31	100,35	0,40	0,06	0,00	0,00	0,47	0,25

Valor mínimo	386,30	0,40	3,00	250,50	0,60	3,30	50,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,70
Valor máximo	437,20	0,50	6,30	924,40	0,90	3,90	225,50	0,70	0,10	0,00	0,00	0,81	2,20
Muestra 4: LLD-04TS													
M1	449,4	0,5	3,2	238,2	1,3	3,8	47,9	0	0	0	0	0	1,2
M2	441,6	0,7	3,2	236,3	1,1	3,8	46,3	0	0	0	0	0	1
M3	420,1	0,4	3,1	220,5	1,1	3,8	40,2	0	0	0	0	0	0,8
Promedio	437,03	0,53	3,17	231,67	1,17	3,80	44,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
Desviación estándar	15,17	0,15	0,06	9,72	0,12	0,00	4,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
Valor mínimo	420,10	0,40	3,10	220,50	1,10	3,80	40,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80
Valor máximo	449,40	0,70	3,20	238,20	1,30	3,80	47,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,20
Muestra 5: LLD-05TS													
M1	165,1	0,2	1,6	110,4	0,4	2	22,9	0	0	0	0	0	0,6
M2	231,3	0,4	2,2	149,7	0,6	10,6	24,8	0	0	0	0	0	0,8
M3	322,2	0,5	3	210,6	0,8	4,5	45,3	0	0	0	0	0	0,9
Promedio	239,53	0,37	2,27	156,90	0,60	5,70	31,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,77
Desviación estándar	78,87	0,15	0,70	50,49	0,20	4,42	12,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15
Valor mínimo	165,10	0,20	1,60	110,40	0,40	2,00	22,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60
Valor máximo	322,20	0,50	3,00	210,60	0,80	10,60	45,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,90
Muestra 6: LLD-06TS													
M1	301,8	0,4	2,7	200,5	0,4	5,3	32,2	0	0	0	0	0	0,9
M2	211,7	0,2	2,1	133,9	2,3	3,3	50,4	0	0	0	0	0	0,9
M3	367,3	0,6	3,2	236,7	1	5	39,7	0	0	0	0	0	1,1
Promedio	293,60	0,40	2,67	190,37	1,23	4,53	40,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,97

Desviación estándar	78,12	0,20	0,55	52,14	0,97	1,08	9,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12
Valor mínimo	211,70	0,20	2,10	133,90	0,40	3,30	32,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,90
Valor máximo	367,30	0,60	3,20	236,70	2,30	5,30	50,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,10
Muestra 7: LLD-07TS													
M1	344	0,4	5,2	203,3	0,6	3,7	54,6	0	0	0,1	0	0	1,5
M2	326,7	0,4	2,7	208,7	0,9	17,7	65,9	0	0	0,1	0	0	2,2
M3	297,8	0,4	2,5	181,7	0,5	7,6	51,1	0	0	0	0	0	1,4
Promedio	322,83	0,40	3,47	197,90	0,67	9,67	57,20	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	1,70
Desviación estándar	23,34	0,00	1,50	14,29	0,21	7,23	7,73	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,44
Valor mínimo	297,80	0,40	2,50	181,70	0,50	3,70	51,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,40
Valor máximo	344,00	0,40	5,20	208,70	0,90	17,70	65,90	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	2,20
Muestra 08: LLD-08TS													
M1	189,2	0,3	2,4	83,5	0,6	2,4	104	0	0	0,1	0	0	1,6
M2	370,2	0,4	3,6	217,9	0,9	4,9	59	0	0	0,1	0	0	1,6
M3	463,5	0,5	3,8	265,5	0,6	11,3	44,2	0	0	0,1	0	0	1,2
Promedio	340,97	0,40	3,27	188,97	0,70	6,20	69,07	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	1,47
Desviación estándar	139,47	0,10	0,76	94,39	0,17	4,59	31,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23
Valor mínimo	189,20	0,30	2,40	83,50	0,60	2,40	44,20	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	1,20
Valor máximo	463,50	0,50	3,80	265,50	0,90	11,30	104,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	1,60
Muestra 09: LLD-09TS													
M1	450,9	0,5	3,3	238,6	0,7	7,7	36,7	0	0	0,1	0	0	1,5
M2	395,6	0,4	3,2	217,4	0,5	2,9	34,2	0	0	0	0	0	0,9
M3	397,9	0,4	3,1	224,6	0,5	2,8	34,9	0	0,1	0	0	0	0,8

Promedio	414,80	0,43	3,20	226,87	0,57	4,47	35,27	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	1,07
Desviación estándar	31,28	0,06	0,10	10,78	0,12	2,80	1,29	0,00	0,06	0,06	0,00	0,00	0,38
Valor mínimo	395,60	0,40	3,10	217,40	0,50	2,80	34,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80
Valor máximo	450,90	0,50	3,30	238,60	0,70	7,70	36,70	0,00	0,10	0,10	0,00	0,00	1,50
Muestra 10: LLD-10TS													
M1	441	0,5	3,7	261,4	0,6	4,7	36,2	0	0	0	0	0,04	1
M2	402,3	0,4	3,1	231,6	0,5	2,7	34,9	0	0	0	0	0,01	0,8
M3	428	0,4	3,3	244,2	0,6	2,7	55,3	0	0	0	0	0	0,8
Promedio	423,77	0,43	3,37	245,73	0,57	3,37	42,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,87
Desviación estándar	19,69	0,06	0,31	14,96	0,06	1,15	11,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,12
Valor mínimo	402,30	0,40	3,10	231,60	0,50	2,70	34,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80
Valor máximo	441,00	0,50	3,70	261,40	0,60	4,70	55,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	1,00
Muestra 11: LLD-11TS													
M1	395,9	0,5	3,1	233,9	0,5	2,6	31,6	0	0	0	0	0	0,8
M2	413,5	0,5	3	237,7	0,5	2,6	31,4	0	0	0	0	0	0,8
M3	418,1	0,8	3,2	246,4	0,6	3,1	31,4	0	0	0	0	0	1,4
Promedio	409,17	0,60	3,10	239,33	0,53	2,77	31,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
Desviación estándar	11,72	0,17	0,10	6,41	0,06	0,29	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35
Valor mínimo	395,90	0,50	3,00	233,90	0,50	2,60	31,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80
Valor máximo	418,10	0,80	3,20	246,40	0,60	3,10	31,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,40
Promedio general	381,25	0,45	3,21	242,19	0,72	5,67	51,33	0,02	0,02	0,03	0,00	0,04	1,22
Desviación estándar	43,12	0,12	0,67	60,56	0,21	3,76	19,52	0,04	0,02	0,02	0,00	0,05	0,25

Valor mínimo	165,10	0,20	1,60	83,50	0,40	2,00	22,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60
Valor máximo	553,80	0,80	6,30	924,40	2,30	33,90	225,50	0,70	0,20	0,10	0,00	0,81	2,20

Anexo 5. Resultado de análisis de humedad total en las muestras de lodos de la PTAR Los Tajos.

ID muestra	PV (g)	P + M (g)	P + R 105 °C (g)	P + R 550 °C (g)	Masa de la muestra	Masa de la muestra seca 105 °C (g)	Masa de la muestra seca 550 °C (g)	% Masa Seca 105 °C	% Masa Seca 550 °C	% Humedad 105 °C	% Humedad 550 °C
LLD-01TS	55,9568	73,5589	61,6153	58,4464	17,6021	5,6585	2,4896	32,15	14,14	67,85	85,86
LLD-02TS	58,3991	68,2904	61,3137	59,7532	9,8913	2,9146	1,3541	29,47	13,69	70,53	86,31
LLD-03TS	60,6619	74,7128	64,9168	62,6354	14,0509	4,2549	1,9735	30,28	14,05	69,72	85,95
LLD-04TS	57,7020	72,4672	61,7347	59,4724	14,7652	4,0327	1,7704	27,31	11,99	72,69	88,01
LLD-05TS	64,2913	74,5344	67,1132	65,5788	10,2431	2,8219	1,2875	27,55	12,57	72,45	87,43
LLD-06TS	74,0562	84,0415	76,8796	75,3489	9,9853	2,8234	1,2927	28,28	12,95	71,72	87,05
LLD-07TS	60,3679	70,1037	63,2399	61,6779	9,7358	2,8720	1,3100	29,50	13,46	70,50	86,54
LLD-08TS	59,7139	69,4482	62,7593	61,1114	9,7343	3,0454	1,3975	31,29	14,36	68,71	85,64
LLD-09TS	74,0493	84,0785	77,0538	75,4311	10,0292	3,0045	1,3818	29,96	13,78	70,04	86,22
LLD-10TS	73,8043	83,7377	76,8310	75,2489	9,9334	3,0267	1,4446	30,47	14,54	69,53	85,46
LLD-11TS	60,8116	70,8325	63,9228	62,2841	10,0209	3,1112	1,4725	31,05	14,69	68,95	85,31
								Promedio	29,75		70,25

Anexo 6. Resultado de análisis de pH en las muestras de lodos de la PTAR Los Tajos

Muestra	pH	
	Agua	KCl
LLD-01TS	6,47	6,78
LLD-02TS	6,26	6,76
LLD-03TS	6,94	7,15
LLD-04TS	7,84	7,74
LLD-05TS	6,66	6,92
LLD-06TS	6,90	6,99
LLD-07TS	6,45	6,84
LLD-08TS	6,44	6,80
LLD-09TS	8,23	7,45
LLD-10TS	7,27	7,08
LLD-11TS	7,03	7,06
Promedio	6,95	7,05

