

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO



Extracción de metales pesados de biosólidos con *Beta vulgaris*

Por:

WALTER ALEJANDRO VILLALOBOS LÓPEZ

TESIS

**Presentada como Requisito Parcial para
Obtener el Título de:**

INGENIERO AGRICOLA Y AMBIENTAL

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Diciembre del 2021

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISION DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Extracción de metales pesados de biosólidos con *Beta vulgaris*

Por:

WALTER ALEJANDRO VILLALOBOS LÓPEZ

TESIS

Que somete a la consideración del H. Jurado Examinador como
requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRICOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por:


Dra. Alma Patricia García Villanueva

Asesor Principal


Dr. Edmundo Peña Cervantes

Coasesor


M.C. Fidel Maximiano Peña Ramos

Coasesor




M.C. Sergio Sánchez Martínez

Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, Diciembre 2021

Declaración de no plagio

El autor de quien es responsable directo, jura bajo protesta de decir la verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o el autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (autor plagio); comparar, robar, o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas y razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción edición o modificación, será perseguido o sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original

Pasante



Walter Alejandro Villalobos López

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme culminar este ciclo de la vida y poder comenzar con la vida profesional. Por darme la motivación y la inspiración para lograr los retos diarios y ponerme a lo largo del camino las personas y herramientas necesarios para hacer esto posible

A mis padres y hermanos por ser mi apoyo durante toda mi vida y guías para lograr cualquier reto que se me presente.

A mi madre Silvina López Espíritu, sinónimo de mujer guerrera, por enseñarme que el trabajo, inteligencia y perseverancia son lo que hacen todos los sueños posibles.

A mis amigos Gloria Elizabeth, Alejandra Zuñiga, Estefanía Torres, Ricardo López, con ellos disfrute cada día de la universidad, logramos cada uno de los retos presentados durante la carrera, nos convertimos en familia y pasamos juntos los mejores y peores momentos tanto personales y estudiantiles

A mis maestros Dra. Alma Patricia García Villanueva, M.C. Alejandra Escobar, Dr. Edmundo Peña e Ing. Fidel Maximiano Peña, que sin ellos no sería esto posible, que fueron parte fundamental de mi desarrollo, gracias por compartirme sus conocimientos, por guiarme, corregirme, creer en mi y por su paciencia. Por ser las personas que día a día forman profesionales, en los que siembran conocimientos y cariño que distingue a cada uno de ustedes,

DEDICATORIA

Dedico este logro a Dios por no soltarme de su mano y la sabiduría que me brinda todos los días, por no abandonarme en ningún momento y todas las bendiciones que me otorga

A mi madre Silvina López Espiritu, este logro es para ti, por tu confianza y fe, por tu apoyo incondicional, por ser la mejor guía en este camino llamado vida, por todo el amor que me brindas y por el sacrificio que haces por mí y mis hermanos, sin ti nada sería posible. Por ser fortaleza, inspiración y enseñarme lo que es el verdadero amor de madre y que no hay ningún momento difícil que no se pueda resolver.

A mis hermanos Silvia Elizabeth y Marco Antonio y mi padre Marco Antonio, que siempre han sido mentores, consejeros, confidentes, motores de arranque y por todos los momentos de felicidad que me regalan siempre. Me enseñan que todo es posible y que todo esfuerzo realizado tiene una buena recompensa, no hay algún imposible para ustedes y su esfuerzo diario y trabajo me llena de orgullo, este logro es de ustedes y su felicidad es la mía, gracias por regalarme nuevamente la felicidad de la unión familiar mediante mis sobrinos y cuñada Blanca Valdovinos

A mi familia tías, primos, abuelos, familia López Aguilar, Anllela López Aguilar, López Gómez, Macías López, Espiritu López. Al inicio fue difícil marcar distancia entre nosotros, pero por su apoyo, fe y amor se logró el propósito de terminar la carrera y titularme, siendo una meta de tantas planeadas en nuestra vida, dedicando este logro a cada uno de ustedes

A mis amigos Gloria Elizabeth, Alejandra Zúñiga, Estefanía Torres y Ricardo López por el apoyo, la confianza y el cariño brindado todo este tiempo, fueron inspiración desde el primer día y aunque sin conocernos, desde el principio tuvimos una buena amistad. Compartiendo sueños y hoy viendo cumplidas algunas de nuestras metas, siento que vamos por buen camino y me alegra ver el desarrollo que cada uno está teniendo en su vida personal y profesional, me llena de alegría ver sus logros gracias a Dios por ponérmelos en el camino.

A la familia Vélez Cordova y Zúñiga Escobedo, por abrirme las puertas de sus casas todos estos años y hacerme parte de su familia, enseñándome que la gente buena aún existe y esta llena de alegría como solo ustedes saben.

Al profesor Eduardo Landeros, a su esposa Jesu Rodríguez y su familia, sinónimo de disciplina, amor y unión, nunca conocí personas tan agradables y serviciales, gracias por tantos momentos gratos y por permitirme ser como su hijo adoptivo. Gracias por ser los pioneros de la disciplina de Karate Do, deporte que me acogió durante varios años y junto con todos mis amigos logramos muchas tardes agradables.

A Iván Benetty Merida Morales, Jessica Figueroa y Marilú Flores, mi familia que hice en Saltillo, por darme siempre motivación, inspiración y enseñarme que todo se logra luchando por lo que se quiere, son perseverancia en su totalidad. Gracias por escucharme y aconsejarme, por compartir conmigo cada cena y darme tanta alegría, son personas brillantes y los mejores deseos siempre para toda su vida.

A Brenda Monserrat y Diana Alfaro, son muestra de que no es necesario frecuentar diario a las personas para mantener una buena amistad. Amistad desde secundaria y poder ver como cada uno cumple sus metas, es satisfactorio. Gracias por ser mis confidentes y las personas en las que brindo toda mi confianza y estar siempre para escucharnos y poder recordarnos las metas y sueños que tenemos en la vida, gracias por motivarme e inspirarme a seguir siempre con buena actitud ante la vida, aunque a veces el panorama no pinte de la mejor manera, siempre hay motivos para seguir adelante.

Al Dr. Marco Villegas, por su apoyo estos últimos años, asesoramiento, amistad y paciencia, gracias por siempre estar y por ser actor de cambio en la forma de transmitir los conocimientos y ser persona comprometida y dedicada.

A Erika Lorena Sánchez cualquier consejo recibido de ti y aprendizaje, aún lo tengo presente, aprendí que cualquier trabajo realizado con ética y dando el mejor desempeño, siempre tiene buenos frutos. No hay reto alguno que tu no puedas y la sabiduría, compromiso y fe es la clave del éxito, gracias por estar en cualquier tipo de situación, por la orientación y confianza, por tu sincera amistad y apoyo personal y profesional, eres una mujer llena de bondad que me alegra tener en mi vida.

Jairo Martín, Alma Salazar, Yessica Jimenez, Araceli Zambrano, Raúl Manzo y Ray Williams. Gracias por su apoyo, consejos, amistad, orientación, por tantos momentos agradables y por la amistad sincera que me brindan, por compartir mismos propósitos, ser unas personas con una calidez humana sorprendente, llenas de ética, y comprometidas profesionalmente que me otorgan inspiración en el mundo laboral, para ustedes cualquier reto no es imposible.

INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE CONTENIDO	I
INDICE DE CUADROS	IV
INDICE DE FIGURAS	V
RESUMEN	7
INTRODUCCIÓN	8
OBJETIVOS	9
Objetivo general	9
Objetivos específicos:.....	9
HIPÓTESIS	9
REVISIÓN DE LITERATURA	10
<i>Acelga (Beta vulgaris)</i>	10
Denominación	10
Siembra	11
Épocas de siembra.....	11
El Agua.....	11
Importancia del agua.....	11
Agua residual.....	13

Valor del agua residual.....	13
Gestión de las aguas residuales	14
El ciclo de gestión de aguas residuales	14
Normas oficiales mexicanas para aguas residuales	15
Tratamiento de aguas residuales	16
Lodos de agua residual.....	17
Lodos provenientes de tratamientos biológicos.....	17
Lodos provenientes de tratamiento físico - químicos.....	18
Norma Oficial Mexicana, NOM-004-SEMARNAT-2002	19
Aplicaciones agrícolas de los biosólidos.....	21
Fitorremediación.....	23
Cultivos para fitoextracción	24
MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
Ubicación del sitio experimental.....	28
Tratamientos	28
Diseño experimental	28
METODOLOGIA.....	29
Preparación del lodo de PTAR.....	29
Preparación del suelo.....	29
Siembra	30

Análisis de absorción atómica.....	31
Determinación de fosforo	32
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
Corte I.....	34
Corte II.....	45
CONCLUSIONES	56
LITERATURA CITADA.....	57

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos	20
Cuadro 2. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos	20
Cuadro 3. Aprovechamiento de los biosólidos, se establece en función del tipo y clase	21
Cuadro 4. Minerales presentes en lodos residuales extraídos por Beta Vulgaris en el corte 1	34
Cuadro 5. Minerales presentes en lodos residuales extraídos por Beta Vulgaris en el corte 2	45

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo hidrológico.....	12
Figura 2. Tratamientos para el saneamiento de aguas residuales.....	16
Figura 3. Recolección de lodo.....	29
Figura 4. Cribado del suelo.....	30
Figura 5. Primer y segundo corte de acelga.....	30
Figura 6 segundo corte.....	30
Figura 7. Pesado de las muestras.....	31
Figura 8. Medición de los metales por absorción atómica.....	32
Figura 9. Muestra con solución de molibdato y disolución reductora.....	32
Figura 10. Medición de fosforo por espectrofotometría.....	33
Figura 11. Zinc extraído por <i>B. vulgaris</i> de lodos residuales a diferentes dosis.....	35
Figura 12. Potasio extraído por <i>B. vulgaris</i> de lodos residuales a diferentes dosis.....	36
Figura 13. Hierro extraído por <i>B. vulgaris</i> de lodos residuales a diferentes dosis.....	37
Figura 14. Cobre extraído por <i>B. vulgaris</i> de lodos residuales a diferentes dosis.....	38
Figura 15. Plomo extraído por <i>B. vulgaris</i> de lodos residuales a diferentes dosis.....	39
Figura 16. Manganeso extraído por <i>B. vulgaris</i> de lodos residuales a diferentes dosis.....	40
Figura 17. Calcio extraído por <i>B. vulgaris</i> de lodos residuales a diferentes dosis.....	41
Figura 18. Sodio extraído por <i>B. vulgaris</i> de lodos residuales a diferentes dosis.....	42
Figura 19. Magnesio extraído por <i>B. vulgaris</i> de lodos residuales a diferentes dosis.....	43
Figura 20. Fósforo extraído por <i>B. vulgaris</i> de lodos residuales a diferentes dosis.....	44
Figura 21. Zinc extraído por <i>B. vulgaris</i> de lodos residuales a diferentes dosis.....	46
Figura 22. Potasio extraído por <i>B. vulgaris</i> de lodos residuales a diferentes dosis.....	47
Figura 23. Hierro extraído por <i>B. vulgaris</i> de lodos residuales a diferentes dosis.....	48

Figura 24. Cobre extraído por <i>B. vulgaris</i> de lodos residuales a diferentes dosis	49
Figura 25. Plomo extraído por <i>B. vulgaris</i> de lodos residuales a diferentes dosis.....	50
Figura 26. Manganeso extraído por <i>B. vulgaris</i> de lodos residuales a diferentes dosis	51
Figura 27. Calcio extraído por <i>B. vulgaris</i> de lodos residuales a diferentes dosis.....	52
Figura 28. Sodio extraído por <i>B. vulgaris</i> de lodos residuales a diferentes dosis.....	53
Figura 29. Magnesio extraído por <i>B. vulgaris</i> de lodos residuales a diferentes dosis.....	54
Figura 30. Fósforo extraído por <i>B. vulgaris</i> de lodos residuales a diferentes dosis	55

RESUMEN

Se definen a las aguas residuales como aguas de composición variada provenientes de las descargas de diferentes sistemas a las alcantarillas, como lo son; usos municipales, industriales, agrícolas, pecuarios, domésticos y de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas. Las aguas residuales cuando llegan a las plantas tratadoras de agua residual (PTAR), eliminan sus contaminantes en gran medida por la absorción de los lodos, estos son subproductos líquidos, sólidos o semisólidos generados por procesos mecánicos, biológicos y químicos de purificación en las PTAR. Los lodos contienen gran cantidad de materia orgánica, microorganismos, macro y micronutrientes, metales pesados y agua. Durante cada proceso de saneamiento de agua, se generan cantidades de lodo que si no se tratan pueden impactar de manera negativa los recursos naturales. Por ello, el objetivo del trabajo es determinar la capacidad de la acelga (*Beta vulgaris*) para extraer metales pesados de lodos residuales. Se realizó la mezcla de lodo de PTAR y suelo de la UAAAN, estableciendo 4 tratamientos de 5 repeticiones a concentraciones diferentes, más el testigo. La cuantificación de minerales fue por método de absorción atómica y el fósforo por espectrofotometría. Los resultados indican en el primer y segundo corte que Zn, Fe y Mn fueron los minerales con mayor extracción, Durante el primer corte los tratamientos T1 y T5 mostraron mayor absorción de minerales, en el segundo corte fue T1, T2 y T5, siendo los tratamientos con concentraciones más bajas de lodo residual. El zinc, cobre y manganeso incrementaron el contenido de extracción en el segundo corte, y el resto de las variables disminuyeron su extracción.

INTRODUCCIÓN

Se denominan aguas servidas a aquéllas que resultan del uso doméstico o industrial, otras denominaciones son: aguas residuales, aguas negras o aguas cloacales, en general por haber sido utilizadas en procesos de transformación y/o limpieza, estas aguas constituyen un residuo, algo que no sirve para el usuario directo, en muchas ocasiones están formadas por todas aquellas aguas que son conducidas por el alcantarillado e incluyen, a veces las aguas de lluvia y las infiltraciones del terreno, estas aguas residuales presentan composiciones muy variadas y son generadas principalmente por las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general, de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.

Los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) son el producto de la concentración de los sólidos contenidos en el efluente, o de la formación de nuevos sólidos suspendidos resultantes de los sólidos disueltos. Estos lodos o biosólidos son subproductos líquidos, sólidos o semisólidos generados durante los procesos mecánicos, biológicos y químicos de purificación de las aguas servidas en las PTAR. Contienen gran cantidad de materia orgánica, microorganismos, macro y micro nutrientes, metales pesados y agua. Están formados principalmente por agentes contaminantes, debido a la acumulación de materias en suspensión y compuestos orgánicos. Asimismo, son un problema debido a los gases que desprenden como producto de su descomposición, los malos olores, y las bacterias y demás microorganismos patógenos que pueden llegar a generar. De ahí que los lodos residuales, a su vez, deban ser tratados para eliminar, disminuir o transformar estos elementos y que no representen un riesgo para la salud ni el medio ambiente.

Entre los métodos de tratamiento más usados para la estabilización y/o acondicionamiento de los lodos, para su posterior utilización, se pueden mencionar, la estabilización térmica, la alcalina utilizando cal como material para el aumento del pH, eliminación de metales por fitoextracción, etc.

Por lo anteriormente mencionado, se llevó a cabo el presente estudio en el cual se plantean el siguiente objetivo e hipótesis.

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar la capacidad de *Beta vulgaris* para extraer metales de lodos procedentes de una planta tratadora de aguas residuales

Objetivos específicos:

- Cuantificar los metales presentes extraídos por *Beta vulgaris*
- Evaluar los tratamientos en los cuales la eficiencia de extracción por parte de *Beta vulgaris* es más efectiva

HIPÓTESIS

Beta vulgaris tiene la capacidad de extraer metales de lodos provenientes de aguas residuales de planta tratadora

REVISIÓN DE LITERATURA

Acelga (*Beta vulgaris*)

La acelga es una de las hortalizas de hojas verdes más antigua, ya era conocida por los griegos desde hace siglos. Los primeros informes que se tienen de esta hortaliza la ubican en la región del Mediterráneo y en las Islas Canarias (Vavilov, 1951). Aristóteles menciona la acelga en el siglo IV A.C. La introducción a los Estados Unidos fue en el año de 1806.

La acelga es una planta de clima templado, que se desarrolla bien con temperaturas medias; le perjudica bastante los cambios bruscos de temperatura. Se hiela cuando las temperaturas son menores de 5° C bajo cero y detiene su desarrollo cuando las temperaturas bajan de 5°C por encima de cero. En el desarrollo vegetativo las temperaturas están comprendidas entre 6°C y 27 a 33°C, encontrándose su medio óptimo de desarrollo entre 15 y 25°C.

No requiere luz en exceso, tal es así que puede llegar a perjudicarlo si el exceso de luz va acompañado del aumento de la temperatura. La humedad relativa para su desarrollo está comprendida entre el 60 y 90% en cultivos en invernadero. En algunas regiones tropicales y subtropicales se desarrolla bien, siempre y cuando esté en zonas altas y puede comportarse como perenne debido a la ausencia de invierno marcado en estas regiones.

Denominación

Se conoce con el nombre de acelga, acelgas, pero su nombre científico o latino es *Beta vulgaris* o cicla. Pertenece a la familia de las Quenopodiáceas.

El nombre de *Beta* se refiere a los pigmentos que contiene: La betacianina y la betaxantina. Pertenece a una familia de plantas propias de zonas costeras o de terrenos salinos templados. La acelga es una planta bianual y de ciclo largo que no forma raíz o fruto comestible, siendo la hoja la parte comestible.

Siembra

En la acelga se utiliza normalmente la siembra directa, colocando de 2 a 3 semillas por golpe, distantes 0.35 cm sobre líneas espaciadas de 0.4 a 0.5 m, ya sea en surco sencillo o doble.

Se pueden obtener poblaciones de 86,000 plantas por hectárea.

- Densidad de siembra: 8-10 kg/ha
- Distancia entre surcos: 66 o 77 cm a hilera sencilla 92 o 100 cm a hilera doble
- Distancia entre plantas: 25 cm

Épocas de siembra

- **Zona Fría**

Época de siembra: octubre- marzo

Días a la madurez: 50-60

- **Zona Cálida Templada**

Época de siembra: todo el año

Días a madurez: 55-65

El Agua

Importancia del agua

Cubre más del 70 % de la superficie del planeta; se la encuentra en océanos, lagos, ríos; en el aire, en el suelo. Es la fuente y el sustento de la vida, contribuye a regular el clima del mundo y con su fuerza formidable modela la Tierra. Posee propiedades únicas que la hacen esencial para la vida. Es un material flexible: un solvente extraordinario, un reactivo ideal en muchos procesos metabólicos; tiene una

gran capacidad calorífica y tiene la propiedad de expandirse cuando se congela. Con su movimiento puede modelar el paisaje y afectar el clima.

Los océanos dan cuenta de casi el 97,5 % del agua del planeta. Únicamente un 2,5% es agua dulce. Los glaciares, la nieve y el hielo de los cascos polares representan casi el 80% del agua dulce, el agua subterránea 19% y el agua de superficie accesible rápidamente sólo el 1%. Esta baja cantidad de agua de superficie fácilmente accesible se encuentra principalmente en lagos (52%) y humedales (38%).

No habrá sustentabilidad si no se conocen y tienen en cuenta todas las fases de este ciclo de circulación del agua entre los diferentes compartimentos que componen la hidrosfera (Figura 1). Para ello, es necesario no solo velar por la utilización y la distribución eficiente del agua dulce sino también salvaguardar el estado de las cuencas de captación y las aguas subterráneas (antes del consumo), así como el tratamiento y la eliminación adecuada de las aguas de desecho (después del consumo). Es necesario privilegiar el conocimiento del vínculo existente entre el uso del agua y los ecosistemas que la abastecen (Fernández Cirelli, 2012)

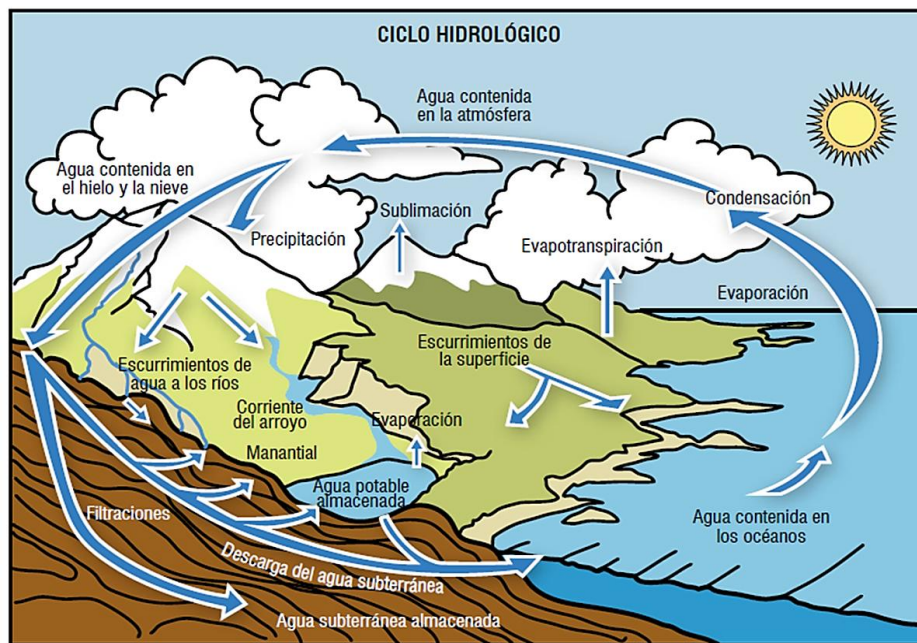


Figura 1. Ciclo hidrológico

Agua residual

Uno de los productos de desecho más conspicuos e importantes por sus consecuencias ambientales son las aguas residuales. Los agentes contaminantes que contienen pueden dañar la salud humana, la biodiversidad y los ecosistemas de ríos, canales, lagos y mares. Aun cuando los ecosistemas acuáticos y terrestres son capaces de procesarlas y diluirlas hasta cierto grado, sin tratamiento y en presencia de altas concentraciones de contaminantes pueden, además de causar la desaparición de la vegetación y la fauna, impedir el aprovechamiento de los recursos hídricos de los cuerpos afectados.

Se considera que el agua está contaminada cuando se ven alteradas sus características químicas, físicas, biológicas o su composición, por lo que pierde su potabilidad para consumo diario o para su utilización en actividades domésticas, industriales o agrícolas. Rodríguez M. *et al.*, (2006) definen a las aguas residuales como aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general, de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.

El acelerado desarrollo industrial ha conducido a un deterioro ambiental de los recursos hídricos en el mundo y al surgimiento de problemas sanitarios y enfermedades asociadas al consumo de agua que afectan a comunidades enteras. Se estima que el 80% de las enfermedades existentes en países en vía de desarrollo son causadas por un abastecimiento de agua deficiente (World Health Organization, 2012).

Valor del agua residual

Siguen siendo un recurso infravalorado, visto con demasiada frecuencia como una carga que debe eliminarse o una molestia que debe ignorarse. Esta percepción debe cambiar para reflejar correctamente su valor: las aguas residuales son una fuente potencialmente asequible y sostenible de agua, energía, nutrientes, materia

orgánica y otros subproductos útiles. Una mejor gestión de las aguas residuales, incluida la recuperación y la reutilización segura del agua y otros componentes clave, ofrece muchas oportunidades. Esto es especialmente cierto en el contexto de una economía circular, donde el desarrollo económico se equilibra con la protección de los recursos y la sostenibilidad ambiental, y donde una economía más limpia y sostenible tiene un efecto positivo en la calidad del agua.

Gestión de las aguas residuales

El ciclo de gestión de aguas residuales

Controlar y regular los diversos flujos de aguas residuales es el fin último de la gestión de aguas residuales. El ciclo de gestión de aguas residuales puede desglosarse en cuatro fases o etapas básicas interconectadas:

a) La prevención o reducción de la contaminación en la fuente

En términos de carga de contaminación y volumen de aguas residuales producidas; prohibir o controlar el uso de ciertos contaminantes para eliminar o limitar su entrada en las corrientes de aguas residuales a través de medios regulatorios, técnicos y/o de otro tipo.

b) La eliminación de contaminantes de las corrientes de aguas residuales

Sistemas operativos (incluida la infraestructura de recolección) y procesos de tratamiento que eliminan diversos componentes de las aguas residuales (es decir, contaminantes) para que puedan utilizarse o devolverse de forma segura al ciclo del agua con mínimos impactos ambientales.

c) El uso de aguas residuales, es decir, reutilización del agua.

Uso seguro de aguas residuales tratadas o no tratadas bajo condiciones controladas para fines beneficiosos. Históricamente utilizadas, en primer lugar, para el riego, las tecnologías de tratamiento de aguas residuales han avanzado para permitir que las

aguas residuales tratadas tengan otros usos, siempre que el nivel de tratamiento y la calidad del efluente sean “aptos para el fin”.

d) La recuperación de subproductos útiles

Se pueden extraer varios componentes de las aguas residuales, ya sea directamente (por ejemplo, calor, nutrientes, materia orgánica y metales) o a través de procesos de transformación adicionales, por ejemplo, biogás procedente de lodos o biocombustibles de microalgas. (PNUMA, 2015).

Normas oficiales mexicanas para aguas residuales

En nuestro país para cuantificar el grado de contaminación y poder establecer el sistema de tratamiento más adecuado, se utilizan varios parámetros expresados en la normatividad oficial vigente, contenidas principalmente:

- **Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996**, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- **Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996**, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
- **Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997**, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.
- **Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002**, Protección ambiental.
- lodos y biosólidos. -especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final

Tratamiento de aguas residuales

Por lo general en el tratamiento de aguas residuales se pueden distinguir hasta cuatro etapas que comprenden procesos químicos, físicos y biológicos:

- **Etapas de tratamiento preliminar**, destinado a la eliminación de residuos fácilmente separables y en algunos casos conlleva un proceso de pre-aireación.
- **Etapas de tratamiento primario**, que comprende procesos de sedimentación y tamizado.
- **Etapas de tratamiento secundario**, que comprende procesos biológicos aerobios y anaerobios y fisicoquímicos (floculación) para reducir la mayor parte de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO).
- **Etapas de tratamiento terciario o avanzado**, Una vez que la masa biológica es separada o removida (proceso llamado sedimentación secundaria), el agua tratada puede experimentar procesos adicionales (tratamiento terciario) como desinfección, filtración, etc. Este efluente final puede ser descargado o reintroducidos de vuelta a un cuerpo de agua natural (corriente, río o bahía) u otro ambiente (terreno superficial, subsuelo, etc.). Los sólidos biológicos segregados experimentan un tratamiento y neutralización adicional antes de la descarga o reutilización apropiada. (Figura 2).

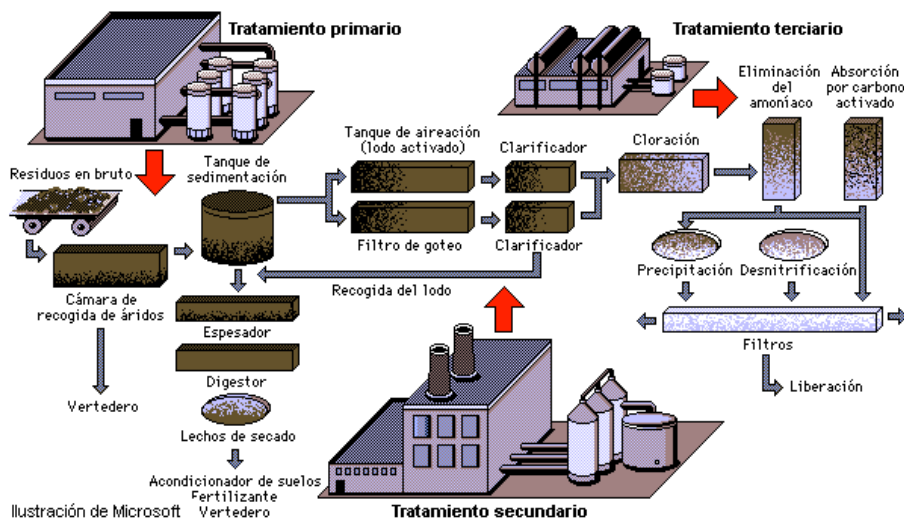


Figura 2. Tratamientos para el saneamiento de aguas residuales

Lodos de agua residual

Las aguas residuales cuando llegan a las plantas tratadoras, eliminan sus contaminantes en gran medida por la absorción de los lodos, estos lodos o biosólidos son subproductos líquidos, sólidos o semisólidos generados durante los procesos mecánicos, biológicos y químicos de purificación de las aguas servidas en las plantas tratadoras de aguas residuales (PTAR.) Contienen gran cantidad de materia orgánica, microorganismos, macro y micro nutrientes, metales pesados y agua. Están formados principalmente por agentes contaminantes, debido a la acumulación de materias en suspensión y compuestos orgánicos en las condiciones de tratamiento. (Amador Díaz *et al.*, 2015).

El lodo resultante de estos procesos debe someterse a un análisis para determinar sus características y con base en esto, plantear las alternativas para el manejo y disposición de este. Observándose que sus características varían en función del proceso que da origen a los lodos.

En muchos casos gran parte de los lodos generados en una PTAR son descargados en sistemas de alcantarillado, en cuerpos de agua o dispuestos en tiraderos a cielo abierto sin ningún tratamiento previo que permita tomar las medidas de protección adecuadas para evitar la contaminación del suelo, agua subterránea o la atracción de vectores (insectos, ratas, carroñeros, etc.), generando problemas de contaminación de los mantos freáticos y de salud pública.

Lodos provenientes de tratamientos biológicos

Los lodos de las PTAR son el resultado de la concentración de los sólidos contenidos en el efluente (lodos primarios) o de la formación de nuevos sólidos suspendidos (lodos activados) resultantes de los sólidos disueltos. Los tratamientos de las PTAR pueden ser sin digestión, basado en procedimientos de separación física, secundarios con digestión, que comprenden procedimientos físicos y biológicos, en los cuales se reduce la presencia de patógenos, parásitos y el contenido de compuestos carbonados, a los cuales se suman los tratamientos

químicos. Por tanto, la calidad de los lodos, en cuanto a su nivel de estabilización, está determinada en gran medida por el régimen de tratamiento al que son sometidos. El proceso de lodos activados incluye su crecimiento y desarrollo en el tanque de aireación, su posterior paso al tanque de sedimentación y su recirculación al tanque de aireación, proceso que se repite en reiteradas ocasiones hasta el momento que estos son purgados y eliminados del sistema. Entre sus características presentan un color marrón y una apariencia floculenta, y si no ha comenzado a degradarse, tiene un olor a tierra húmeda. La fracción de lodo generado en los tratamientos biológicos de las PTAR está compuesta principalmente por microorganismos, y una parte del lodo está compuesto por materia sólida. Pueden presentar un color marrón o marrón oscuro, si es muy oscuro puede estar próximo a volverse séptico, si es más claro de lo normal puede estar poco aireado. Se deshidratan fácilmente en áreas de secado, o adquieren un color marrón oscuro-negro su olor es relativamente débil.

Lodos provenientes de tratamiento físico - químicos

La aplicación del tratamiento físico químico a los lodos a principios del siglo veinte era muy difundida, pero las elevadas dosis de coagulantes utilizadas, generaban una gran cantidad de lodos, por lo que empezaron a ser desplazados por tratamientos biológicos, que originan menos lodos y tienen una mejor eficiencia en términos de remoción de contaminantes. Actualmente, el tratamiento físico químico utiliza menores dosis de coagulantes, acompañado en ocasiones con una mínima dosis de polímeros, lo que implica bajos costos de operación y un ligero aumento en la cantidad de lodos generados respecto a los tratamientos convencionales. Con el uso del hidróxido de sodio se produce un lodo de color café para dosis bajas de coagulante y de color blanco para dosis elevadas. El floculo formado sedimenta a gran velocidad en los primeros diez minutos. El lodo generado tiene un aspecto homogéneo. El sulfato de aluminio disuelto en agua produce hidróxido de aluminio, que provoca la formación de flósculos de forma prácticamente instantánea. El floculo formado sedimenta con bastante facilidad y rapidez. Al usar este coagulante se genera un lodo de color oscuro. El lodo generado, al usar el cloruro férrico, adquiere

un color café claro para dosis menores de 40 mg/l, entre 40 mg/l y 100 mg/l el color se hace cada vez más oscuro y para dosis superiores a 100 mg/l presenta un color rojizo. El floculo presenta buena sedimentación y se asienta generando capas bien diferenciadas. El poli cloruro de aluminio (PAC) presenta diferentes fases sólidas en las reacciones hidrolíticas, los flósculos forman grupos de pequeñas esferas o estructuras tipo cadena o ambas. Esta diferencia estructural produce una menor turbidez en las aguas. El sulfato férrico se usa como coagulante inorgánico para retirar del agua por coagulación y floculación, las partículas suspendidas coloidales. Se prepara por medio de sulfato ferroso como agente oxidante o por óxido férrico disuelto en ácido sulfúrico.

Norma Oficial Mexicana, NOM-004-SEMARNAT-2002

Esta Norma Oficial Mexicana establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger al medio ambiente y la salud humana.

Para efectos de esta Norma Oficial Mexicana los biosólidos se clasifican en tipos: excelente y bueno en función de su contenido de metales pesados; y en clases: A, B y C en función de su contenido de patógenos y parásitos.

Los límites máximos permisibles de metales pesados se establecen en el cuadro 1.

Cuadro 1. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos

Contaminante (determinados en forma total)	Excelentes mg/kg en base seca	Buenos mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1 200	3 000
Cobre	1 500	4 300
Plo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2 800	7 500

FUENTE: NOM-004-SEMARNAT-2002 Norma oficial mexicana, protección ambiental. - lodos y biosólidos. -especificaciones y límites máximos

Los límites máximos permisibles de patógenos y parásitos en los lodos y biosólidos se establecen en el cuadro 2.

Cuadro 2. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	<i>Salmonella spp.</i> NMP/g en base seca	Huevos de helmintos/g en base seca
A	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 1(a)
B	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

FUENTE: Nom-004-Semarnat-2002 Norma oficial mexicana, protección ambiental. - lodos y biosólidos. -especificaciones y límites máximos

Notas

- (a) Huevos de helmintos viables
- NMP número más probable

El aprovechamiento de los biosólidos, se establecen en función del tipo y clase, como se especifica en el cuadro 3 y su contenido de humedad hasta el 85%

Cuadro 3. Aprovechamiento de los biosólidos, se establece en función del tipo y clase

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación
		Los establecidos para clase B y C
Excelente o bueno	B	Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación
		Los establecidos para clase C
Excelente o Bueno	C	Usos forestales
		Mejoramientos de suelos
		Usos agrícolas

FUENTE: NOM-004-SEMARNAT-2002 Norma oficial mexicana, protección ambiental. - lodos y biosólidos. - especificaciones y límites máximos

Aplicaciones agrícolas de los biosólidos

Los biosólidos presentan un alto valor nutricional y por esta razón pueden ser usados para la agricultura y la jardinería además considera que su contenido de macro y micronutrientes promueven el crecimiento de las plantas y cultivos. Oropeza (2006), establece que de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-1993 el lodo resultante de los procesos en las PTAR debe someterse a un análisis que determinar sus características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad y biológico-infecciosas o análisis CRETIB, con el cual se pueda precisar si el lodo resultante es peligroso o no peligroso. (Melo Cerón *et al.*, 2017)

Martínez de la Cerda (2003), considera que los biosólidos son utilizados ampliamente por sus bondades, lo que hace que su efecto benéfico como fertilizante orgánico se prolongue por varios ciclos de siembra con aplicación única, igualando o incrementado el rendimiento de los cultivos comparado con fertilizantes inorgánicos, también considera el mejoramiento del suelo mediante el incremento de materia

orgánica, capacidad de intercambio catiónico, retención de humedad y población de microorganismos. (Melo Cerón, *et al.*, 2017)

Jorge Aguilar *et al.*, (2017) probaron mezclas de lodo residual y estiércol equino en diferentes porcentajes, por medio de vermicomposteo, para conocer su estabilidad y proponerlo como mejorador de suelo. El producto mostró disminución gradual en el porcentaje de C orgánico, relación C: N y pH. Se incrementó el contenido de N total a los 30 días y la conductividad eléctrica a los 75 días. El P aumentó (57.3 ± 8.3 mg/kg a 1369.8 ± 114.8 mg/kg) al final. La concentración de metales pesados disminuyó para Cu, Zn, Ni y Cd, además el pH que presentó (7.24 ± 0.1) fue neutro, la concentración de P se incrementó considerablemente y el número de lombrices fue mayor con respecto a los otros tratamientos, por lo que esta relación es adecuada para su uso como abono orgánico.

Por su parte Cupe Flores *et al.*, (2018) en una investigación con lodos residuales de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la industria cervecera mencionan que se generan en grandes volúmenes causando problemas de contaminación. Se elaboró Abono Líquido Acelerado (ALA), usando dichos lodos residuales, a través de fermentación homoláctica, empleando para ello el consorcio microbiano B-lac y melaza. Veinticuatro combinaciones diferentes y un control fueron tratados por 5 días a 40 °C. La evaluación microbiológica del T9 estuvo libre de coliformes totales, coliformes fecales y parásitos; además, según el análisis agronómico, se obtuvieron para el abono líquido acelerado: 12.94 % de materia orgánica, 1825.6 ppm, 600 ppm y 5800 ppm de N, P y K respectivamente. Los metales pesados Pb, Cd y Cr estuvieron dentro de los límites permisibles, según normativa internacional. En la prueba de bioensayo de toxicidad en semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) se determinó que la dosis 0.1% del ALA no fue perjudicial para la germinación y crecimiento normal de las plántulas, verificándose por un Índice de Germinación (IG) mayor de 80% (94.9%). En conclusión, el abono orgánico de lodo residual de industria cervecera mostró una buena calidad agronómica.

Fitorremediación

La fitorremediación es un proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o transformar contaminantes (orgánicos e inorgánicos) de suelos, lodos y sedimentos, y puede aplicarse tanto in situ, como ex situ (Volke y Velasco, 2001).

En 1993 se realizaron los primeros experimentos utilizando plantas para extraer metales de lugares contaminados (McGrath *et al.*, 2006), y desde entonces se han descubierto muchas plantas con esta capacidad, que acumulan distintos metales. La capacidad de absorción por parte de la planta varía según el tipo de contaminante, tipo de suelo y pH de este, por lo que es posible adaptar la elección del cultivo al nivel y tipo de contaminación.

Una planta fitorremediadora sigue las tres fases durante su proceso de extracción: Absorción, excreción y desintoxicación de contaminantes.

- **La absorción de contaminantes** se realiza a través de las raíces y las hojas mediante los estomas y la cutícula de la epidermis (Watt y Evans 1999). Esta absorción ocurre en la rizodermis de las raíces jóvenes, que absorben los compuestos por ósmosis dependiendo de factores externos como la temperatura y el pH del suelo. Otros factores importantes que inciden en la penetración del contaminante son su peso molecular e hidrofobicidad que determinan que estas moléculas atraviesen las membranas celulares de la planta. Después de cruzar la membrana, los contaminantes son distribuidos a través de toda la planta (Harvey *et al.*, 2002).
- **Los contaminantes que se absorben por las raíces, se excretan** vía hojas (fitovolatilización). Cuando las concentraciones de los contaminantes son elevadas, solo pequeñas fracciones (menos del 5 %) se excretan sin cambios en su estructura química.
- **La desintoxicación de los compuestos orgánicos** se lleva a cabo por la vía de la mineralización hasta dióxido de carbono.

Llugany. *et al.*, (2007). Mencionan que, para que la técnica de fitoextracción sea efectiva, se requiere una planta con gran producción de biomasa aérea, para acumular mayor cantidad de metal y de un sistema radicular bien desarrollado que explore y limpie extensas áreas de suelo. También es conveniente que presente una tasa de crecimiento elevada

Cultivos para fitoextracción

González *et al.*, (2011). En su investigación encontraron que, la concentración biodisponible (fracción intercambiable) de Cd, Cu, Ni, Pb y Zn en suelos enmendados con biosólidos no muestra una tendencia consistente para todos los metales. La biodisponibilidad no aumenta o disminuye linealmente con el tiempo, después de la aplicación de biosólidos, en un periodo de seis años. Cada metal muestra una tendencia particular. La biodisponibilidad del cobre y del plomo disminuye con el transcurso del tiempo. La del níquel y la del zinc aumentan. Por lo tanto, la antigüedad de la aplicación de biosólidos no influye de manera determinante en el aumento de la biodisponibilidad de los metales.

En una investigación realizada por Tarango *et al.*, (2011), la aplicación de biosólidos digeridos anaeróbicamente como fuente de nutrientes para el nogal pecanero, fue evaluado por tres años. Las yemas crecieron un 16% más y la producción de nueces por árbol fue 11.3% mayor en el tratamiento con biosólidos en un promedio de tres años. La acumulación de As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb en el suelo debido a los biosólidos fue muy baja y de acuerdo con la norma de EE. UU., La tasa mediana anual de acumulación (mg kg^{-1} de suelo), debido a los fertilizantes biosólidos fue de As 1.75, Cd 0.04, Cr 8.1, Hg 0.05, Ni 0.06 y Pb 4.3. la concentración máxima permitida se alcanzará en 34 años. Las cantidades de Cd, Cr, Ni y Pb en la nuez estaban debajo de los límites detectables. El As y Hg se detectaron en cantidades muy pequeñas y estuvieron por debajo de los límites permitidos para nueces en el Reino Unido.

El proceso de biorremediación de plaguicidas organoclorados en un suelo del aeródromo agrícola “El Picacho” del Departamento de Chinandega, Nicaragua, en el que se registran grandes concentraciones de toxafeno. Se empleó la técnica de bioestimulación en el proceso de biorremediación, utilizando biosólidos como fuente de nutrientes esenciales para los microorganismos. A cada tratamiento se agregó diferentes proporciones de biosólido estableciendo relaciones suelo: biosólido de 71:29 y 77:23. Al finalizar los tratamientos se obtuvieron porcentajes de remediación entre 84% y 69% respectivamente. Esto evidencia la efectividad de los biosólidos como fuente de nutrientes para la estimulación metabólica de microorganismos autóctonos en el proceso de biorremediación de suelos contaminados con toxafeno. (Durán Acosta *et al.*, 2016)

La biorremediación aerobia de suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo, a nivel laboratorio y piloto, alcanzó tasas de remoción del 66 al 93 %, donde el mejor tratamiento fue el que contenía lodos residuales (biosólidos) como fuente alterna de nutrientes. La mineralización o madurez de los lodos influyó en la tasa de remoción de hidrocarburos, entre más frescos mayor remoción. La densidad fue también un factor importante para aumentar el porcentaje de degradación. Mantener los suelos a capacidad de campo y con aireación constante es también un buen estimulante de la flora nativa y permitió remociones entre el 60 y 70 %, lo cual es una buena alternativa cuando no existen plantas de tratamientos de aguas residuales cerca a los sitios contaminados (Martínez Prado *et al.*, 2011)

Domínguez R. *et al.*, (2004), mencionan que bioestimularon un suelo contaminado con 15000 ppm de Aceite Residual Automotriz (ARA), con una solución mineral, posteriormente por fitoremediación mediante *Helianthus annuus* (Girasol) y *Zea mays*, sus resultados indicaron que la Bioestimulación (BS) y Fitorremediación (FR) lograron decrecer el ARA hasta 4950 ppm. En tanto, Agamuthu *et al.* (2010), biorremediaron un suelo impactado por 25000 ppm de ARA mediante BS con una enmienda orgánica y FR con *Jatropha curcas*, los resultados reportaron que la integración de la BS y FR disminuyeron el ARA hasta 2600 ppm en 180 días.

La mayoría de las especies del género *Heliconia*, se distribuyen en el Neotrópico, desde el sur de México hasta el norte de Argentina, incluyendo las islas del Caribe, Cortes *et al.*, (2013) y Madera *et al.*, (2013) reportaron que la *Heliconia* ha mostrado resultados muy alentadores, donde ubican esta especie como una planta acumuladora de metales, con gran desempeño en la eliminación de metales pesados (Cd, Pb, Hg y Cr), de la matriz líquida contaminada con múltiples metales, donde se lograron reportar porcentajes de eliminación superior al 90% de los citados metales, indicando que no se presentaron procesos de antagonismo o inhibición en la especie por la toma de un metal y la planta no mostró signo alguno de daño como hojas amarillas o clorosis. Los estudios con esta especie estuvieron alrededor de un 5 al 10% con más capacidad de eliminación de los citados metales que un sistema sin plantas. Así mismo, esta especie en el caso de metales como Hg (II) y Cr (VI), logro traslocar una cantidad importante de estos metales desde la raíz a los tejidos aéreos (tallo, hoja), característica importante en el proceso de fitoremediación, por lo cual se puede calificar esta especie como acumuladora de metales pesados.

El mezquite (*Prosopis spp.*) es capaz de acumular altos niveles de plomo en las raíces y también de traslocar este metal a sus partes aéreas, además cuando se adiciono EDTA se observó que existió una mayor acumulación de plomo en los tejidos, y un mayor movimiento hacia las hojas. (Aldrich *et al.*, 2004)

Villadóniga *et al.*, (2008) realizaron un estudio de suelos contaminados con mercurio (Hg) y la identificación de especies de 20 plantas óptimas para la fitorremediación del sitio. Se encontraron dos especies, *Marrubium vulgare* que acumulo en sus partes aéreas de $38.5 \pm 3.15 \text{ mg kg}^{-1}$ de Hg y *Rumex induratus*, que en su parte aérea mostraba una concentración de $22.68 \pm 2.16 \text{ mg kg}^{-1}$ de Hg, con lo cual se concluyó que ambas especies pueden ser consideradas para la fitorremediación de las zonas contaminadas

Por su parte Munive *et al.*, (2020) en un trabajo usaron girasol como planta fitorremediadora, probandola sobre suelos que contienen las altas concentraciones de Pb y Cd, presentando efectos negativos en la producción de biomasa. La planta de girasol absorbe los metales pesados como lo demuestra la mayor acumulación de

plomo y cadmio en la raíz de ésta, no se encontraron diferencias significativas entre la acumulación de plomo en tallos y flores, tallos y hojas, para cadmio en los tallos y hojas, confirmando que la aplicación de las enmiendas orgánicas contribuye a solubilizar el Pb y Cd del suelo, además de contribuir en un mayor desarrollo del cultivo. Los valores del Factor de Bioconcentración (FBC) de Cadmio (0,53 - 0,66) fueron mejores que el plomo (0,07 - 0,08), mientras que los valores del Factor de Translocación (FT) indicaron una capacidad del girasol como un fitoestabilizador.

Se evaluó la tasa fotosintética y la concentración de plomo en raíz, tallo y hoja, en plantas jóvenes de huizache. Las dosis de nitrógeno y las concentraciones de plomo por separado no produjeron diferencias significativas en la tasa fotosintética de las plantas de huizache, pero la interacción entre esos dos factores fue estadísticamente significativa ($P=0.0074$), encontrándose que la mayor acumulación de plomo ocurrió en la parte aérea de la planta con una media de $352.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. (Amador Díaz *et al.*, 2015).

En una planta metalúrgica localizada en Durango, México, representando esta una de las fuentes emisoras de compuestos de plomo más grandes en el país, provocando contaminación al medioambiente y riesgos a la salud, se llevó a cabo un estudio el cual consistió en evaluar las especies de pastos *Setaria verticillata L.* y *Cenchrus ciliaris L.* como fitoestabilizadoras de metales pesados al desarrollarse en suelos con diferentes concentraciones de Pb y Cd. Se encontró que *Setaria verticillata L.* acumuló significativamente mayor cantidad de plomo (10.61 mg kg^{-1}) y cadmio en la raíz (1.18 mg kg^{-1}) y mayor concentración de cadmio en tejidos aéreos (0.64 mg kg^{-1}) que *Cenchrus ciliaris L.* ($2.22, 0.63$ y 2.22 mg kg^{-1}) La acumulación de plomo y cadmio en ambas especies es reducida con respecto a la concentración de los metales presentes en el sustrato. Dosis de plomo ($0,100$ y 200 mg Kg^{-1}) y dosis de cadmio (0 y 10 mg Kg^{-1}). (Galaviz L. *et al.*, 2011).

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del sitio experimental

El presente estudio se realizó en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) (25°21'12.51" N y 101°01'51.11" O), en los Departamentos de Ciencias del Suelo y Forestal, la recolección de suelo se realizó en "El bajío" y la recolección de lodo en la Planta Tratadora de aguas residuales del Estado de Coahuila, en el municipio de Saltillo (25°22'28.54" N y 101°00 '42.90"O).

Tratamientos

Los tratamientos para este experimento fueron los siguientes:

Tratamiento 1.- 5% Lodo residual + 95% Suelo Bajío

Tratamiento 2.- 10% Lodo residual + 90% Suelo Bajío

Tratamiento 3.- 15% Lodo residual + 85% Suelo Bajío

Tratamiento 4.- 20% Lodo residual + 80% Suelo Bajío

Tratamiento 5.- Testigo. - Suelo Bajío

Diseño experimental

Los tratamientos se distribuyeron de acuerdo al Diseño Experimental Completamente al Azar y originó 5 tratamientos incluyendo el testigo, con cinco repeticiones. A los datos generados, se les efectuó un análisis estadístico, el que consistió en el análisis de varianza (ANVA) y la prueba de comparación de medias, mediante el método de Tuckey ($p \leq 0.05$); para este se empleó el paquete estadístico SAS versión 4.0

METODOLOGIA

Preparación del lodo de PTAR

Una vez hecha la recolección del lodo (Figura 3) se realizó la limpieza de manera manual. Se utilizó un molino para deshacer los terrones y cribado del lodo para obtener unas partículas finas, se rotuló y almacenó el lodo en bolsas plásticas para su posterior utilización.



Figura 3. Recolección de lodo

Preparación del suelo

Se recolecto suelo arcilloso proveniente del área del bajío de la UAAAN, al cual se le eliminaron los agentes físicos presentes: piedras, ramas, basura, etc. Se cribo (Figura 4), para obtener una muestra fina. La muestra se embolsa y rotula para su posterior uso.



Figura 4. Cribado del suelo

Siembra

Las macetas se ubicaron en el invernadero, se sembraron 3 semillas por cada maceta. El primer corte de las hojas se realizó al mes de siembra, (Figura 5), se retiraron las hojas grandes de cada planta, dejando el tallo y las hojas pequeñas, permitiendo nuevamente el crecimiento vegetativo para realizar el segundo corte. Las hojas se introdujeron en bolsas de papel para su posterior análisis. El segundo corte (Figura 5) se realizó al segundo mes de la siembra.



Figura 5. Primer y segundo corte de acelga

Análisis de absorción atómica

Las muestras se metieron a la estufa a 65° C durante 24 horas, (Figura 6). Se utilizaron crisoles en peso constante para colocar el material vegetativo previamente secado en la estufa. En el crisol se agregó 1 gramo de la muestra (Figura 7). Se pesó el crisol más el peso de la muestra y se registró el valor. La mufla se prendió a 600° C, y las muestras se introdujeron durante 3 horas. Se calculó la diferencia de peso entre las medidas antes y después de calcinar; esta diferencia de peso equivale a la cantidad de materia orgánica que se perdió de la muestra por efecto de la calcinación. Se agregó un mililitro de ácido nítrico al 65% a cada crisol, se pasó la muestra a un matraz y se aforó cada muestra con agua destilada. En vasos de precipitado se colocó papel filtro #40 y se agregó la muestra en ellos, el filtrado se guardó en botes de plástico. Después las muestras se analizaron en el equipo de absorción atómica (Figura 8).



Figura 6. Secado de muestras por 24h a 65 °C

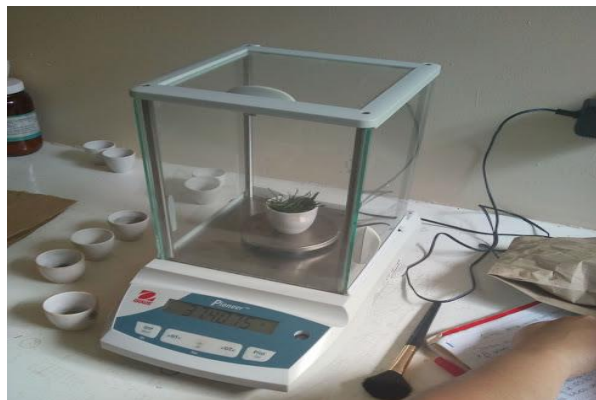


Figura 7. Pesado de las muestras



Figura 8. Medición de los metales por absorción atómica

Determinación de fósforo

A un matraz de aforación se agregaron 10 ml de cada muestra de tratamiento sin dejar de agitar se añadieron 5 ml de disolución de molibdato y 3 ml de disolución reductora (Figura 9). Se aforó con agua destilada a 100 ml y se agitó la mezcla para homogeneizarla. Las muestras se dejaron reposar 6 minutos. Se realizó la medición de la muestra en el espectrofotómetro midiendo la absorbancia a una longitud de onda de 660 nm empleando como blanco una disolución preparada de igual manera, pero sin analito. (Figura 10)



Figura 9. Muestra con solución de molibdato y disolución reductora



Figura 10. Medición de fosforo por espectrofotometría

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Corte I

Los resultados del análisis de varianza (ANVA) en corte I mostraron diferencias significativas para las variables Zinc (Zn), Potasio (K), Hierro (Fe), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Manganeso (Mn) y Calcio (Ca) ($\rho < 0.05$) entre tratamientos (Cuadro 4). Los resultados obtenidos del ANVA no mostraron diferencias significativas ($\rho > 0.05$) en las variables Sodio (Na), Magnesio (Mg), Fósforo (P), entre tratamientos, numéricamente se observó que el T1 y T2 aventajaron a estas variables.

Cuadro 4. Minerales presentes en lodos residuales extraídos por *Beta Vulgaris* en el corte 1

Corte I										
Tratamiento	Zn	K	Fe	Cu	Pb	Mn	Ca	Na	Mg	P
Unidades	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%	%
T1	199.60 ab	10.70 a	535.10 a	19.25 c	49.00 b	107.70 b	2.60 ab	7.70 a	3.80 a	0.82 a
T2	190.90 b	6.50 b	253.90 bc	25.60 bc	33.20 b	77.40 bc	2.10 abc	7.50 a	4.10 a	0.41 a
T3	289.00 a	7.10 b	146.70 c	32.74 a	42.80 b	51.30 bc	2.00 bc	7.20 a	2.60 a	0.63 a
T4	226.40 ab	6.50 b	298.40 b	24.75 bc	44.10 b	32.80 c	1.60 c	6.30 a	3.60 a	0.49 a
T5	148.50 b	4.80 c	376.90 b	30.22ab	74.60 a	222.80 a	2.70 a	7.50 a	4.00 a	0.47 a
C.V.(%)	16.80	2.90	14.30	9.30	18.60	26.87	12.20	9.40	18.50	25.00

C.V.(%) = Coeficiente de variación en por ciento

Zinc (Zn)

De acuerdo con los resultados del análisis de varianza para el elemento zinc, la prueba de medias presenta diferencias estadísticamente significativas ($\rho < 0.05$) entre tratamientos (Figura 11). Se observó que el T3 y el T4 presentaron valores de extracción de 289.07 y 226.40 mg kg⁻¹, superando al testigo con 140.50 y 77.83 mg kg⁻¹ respectivamente. Cobre y Zinc compiten por los mismos sitios de transporte, para ser extraídos por las plantas (Pearson *et al.*, 1996), en este caso *Beta vulgaris* presentó en el primer corte mejor asimilación de Zn.

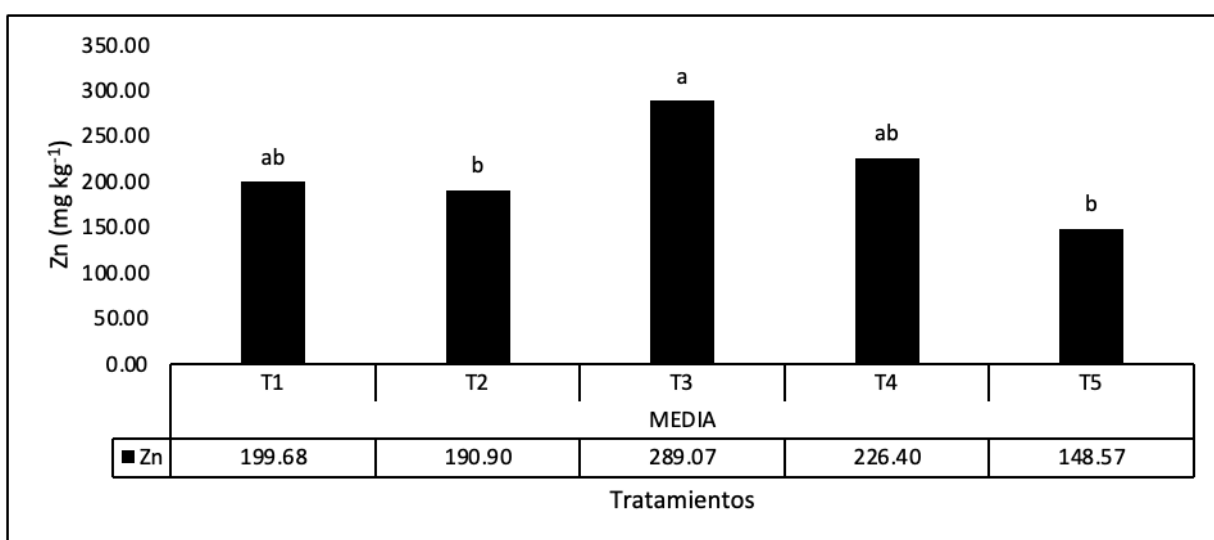


Figura 11. Zinc extraído por *B. vulgaris* de lodos residuales a diferentes dosis

Potasio (K)

En relación al elemento potasio, en la figura 12 se presentan tres grupos con diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$), en el primer grupo se encuentra al tratamiento 1 el cual presenta la mayor concentración de este elemento (10,78 %) y supera a la extraída por el segundo grupo, en el cual están incluidos el T2, T3 y T4 (6.60, 7.12 y 6.59 %), el tercer grupo incorpora solamente al tratamiento 5, siendo superado por todos los anteriores. Esto muestra que *Beta vulgaris* presenta una mayor movilidad de K para su extracción en bajas concentraciones de lodo residual para ser asimilado por la planta, respuesta que concuerda con Chaveli *et al.*, (2012) al demostrar que la aplicación de lodo residual incrementa el contenido de potasio y fósforo en el cultivo de hortalizas. Este elemento es de rápida movilidad en la planta y regulador de otros nutrientes por lo que su carencia se ve reflejada en otros (Pita y García, 2012).

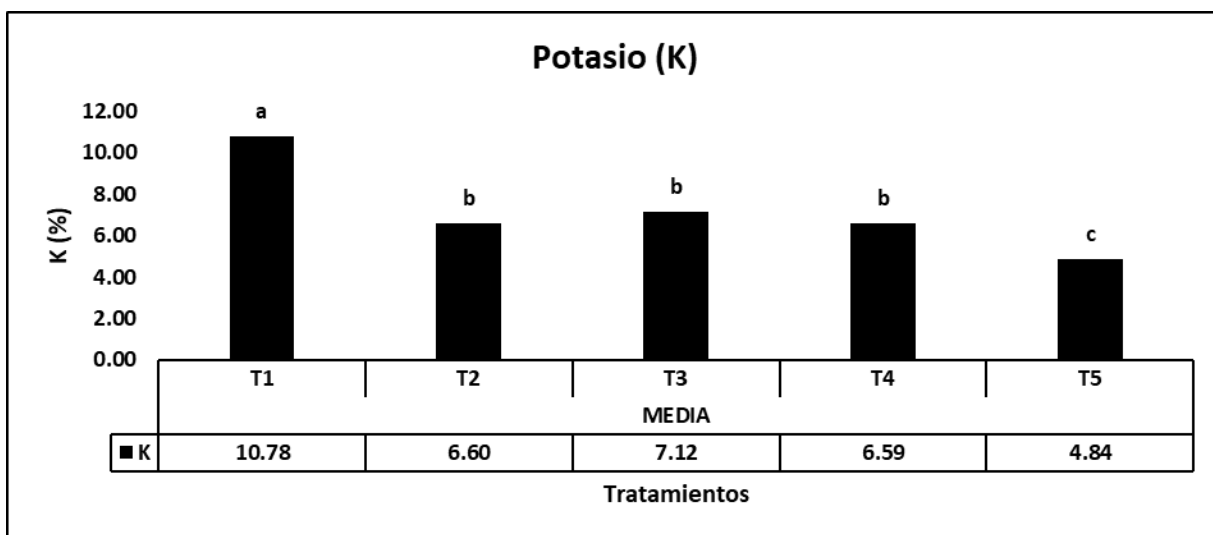


Figura 12. Potasio extraído por *B. vulgaris* de lodos residuales a diferentes dosis

Hierro (Fe)

En relación al elemento hierro en la figura 13 se observa al T1 con una concentración de 535.18 mg kg⁻¹ rebasando a los demás tratamientos, siendo el T3 el que presentó la más baja concentración con 146.78 mg kg⁻¹.

La textura del suelo influye en la disponibilidad de este microelemento: suelos arcillosos presentan más Fe disponible, mientras que suelos arenosos presentan menos disponibilidad; la materia orgánica forma complejos orgánicos llamados quelatos, mismos que facilitan la disponibilidad del Fe para la planta. Respecto de los lodos residuales, el hierro se encuentra en forma de óxidos de hierro (Morales, 2020), haciendo necesario el uso de procesos diversos para que la planta lo pueda asimilar en forma de Fe²⁺, uno de ellos es la liberación de H⁺ a través de las raíces de la planta, reduciendo el pH en la rizosfera, dejando en evidencia que el pH en el T1 pudo influir en su concentración

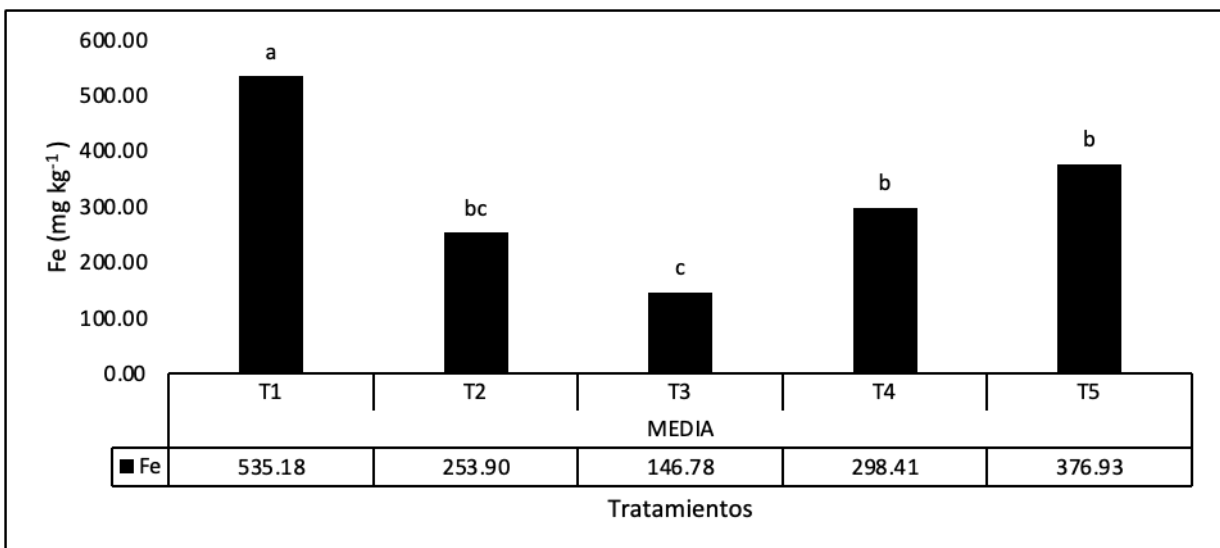


Figura 13. Hierro extraído por *B. vulgaris* de lodos residuales a diferentes dosis

Cobre (Cu)

El Cu tiene una movilidad relativamente baja respecto a otros elementos en las plantas, permaneciendo en los tejidos de las raíces y hojas hasta su senescencia. En la figura 14 se observa que hubo diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) para este elemento, siendo el T3 el de mayor concentración y superando al testigo en un 8.33%. Coincidiendo con León y Sepúlveda (2012), el cobre es un metal tóxico cuando se encuentra en los tejidos a concentraciones mayores a las necesarias para el crecimiento vegetal ($>30 \text{ mg kg}^{-1}$), se realizó un estudio con *Ambrosia ambrosioides* y el cobre es el metal pesado que más absorbió a una concentración 20 mg L^{-1} , presentó la mayor acumulación en raíz, tallo y hoja con 15.8272, 13.0309 y 49.794 g kg^{-1} respectivamente. Contribuyendo este trabajo al agregar a *Beta vulgaris* como una opción efectiva para la extracción de este elemento.

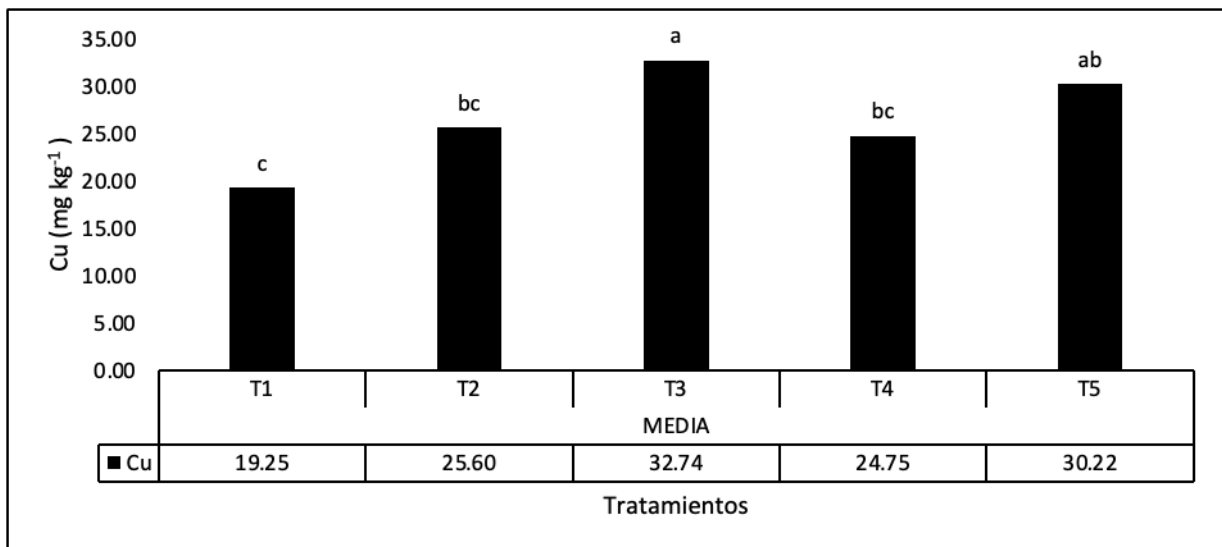


Figura 14. Cobre extraído por *B. vulgaris* de lodos residuales a diferentes dosis

Plomo (Pb)

En plomo se pueden observar diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$), aunado a que el tratamiento con más baja concentración de extracción se presentó en T2 con 33.23 mg kg^{-1} . Así como también, se observa que los tratamientos T1 y T4 presentaron valores similares de 49.03 y 44.12 mg kg^{-1} . (Figura 15).

La especie *Beta Vulgaris* fue señalada como especie tolerante a plomo y cadmio durante las etapas de germinación y desarrollo de la plántula, esta especie pertenece a la familia *Chenopodiaceae* dentro de la cual se hallan especies fitorremediadoras plenamente identificadas (Raskins y Ensley, 2000). Concluyendo que durante sus primeras etapas fenológicas las plantas son tolerantes y menos extractoras de plomo en condiciones de mayor grado de contaminación.

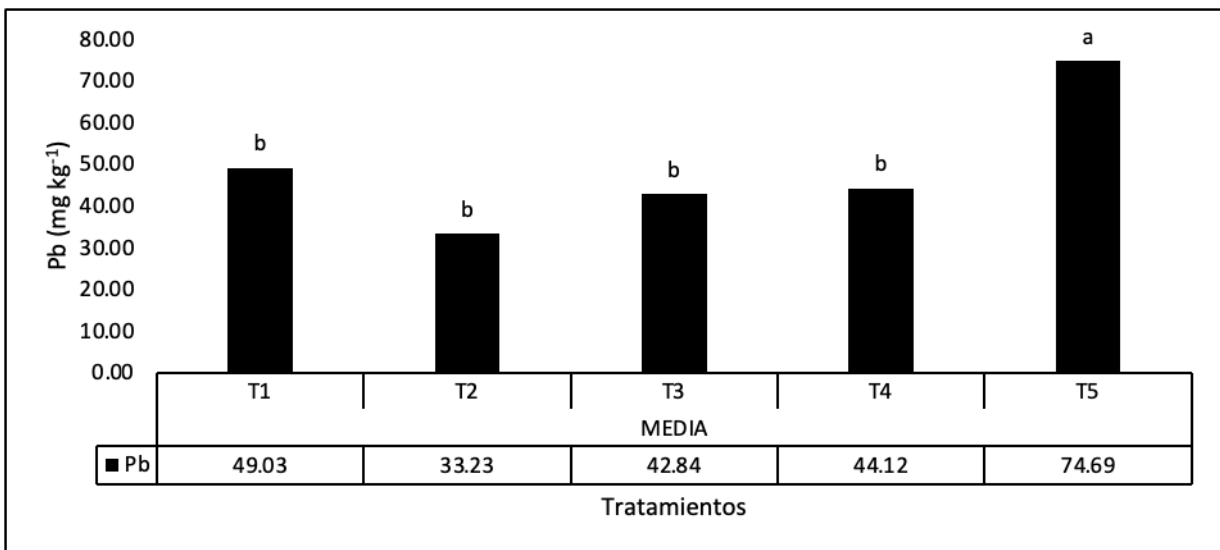


Figura 15. Plomo extraído por *B. vulgaris* de lodos residuales a diferentes dosis.

Manganeso (Mn)

En la figura 16 se observa que hubo diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$), y de manera gráfica la cantidad de manganeso extraído por la planta en los distintos tratamientos. Se puede observar que la cantidad de lodo residual utilizado y la cantidad de mineral extraído son inversamente proporcional, sin embargo, el tratamiento testigo fue el que tuvo la mayor cantidad de extracción ($222.68 \text{ mg kg}^{-1}$). Por la disposición de absorción y coincidiendo con Mahler (2003), la absorción de Mn es mediante transporte activo de otros cationes divalentes como Mg^{2+} y Ca^{2+} cuando la disponibilidad de Mn es elevada en el suelo, es rápidamente traslocado dentro de la planta. Se puede asumir que el Mn lo provee principalmente el suelo (T5) y no los lodos residuales, ya que, según Cupe y Juscamaita (2018) y Chávez y Rodríguez (2011) las cantidades de este elemento en lodos residuales no rebasa los 7 mg kg^{-1} .

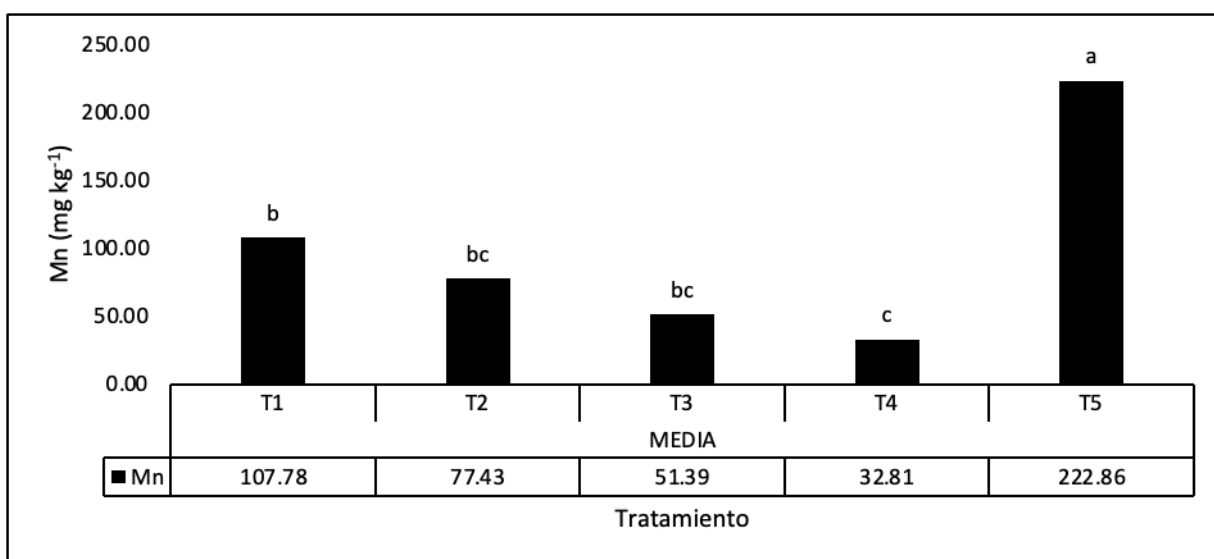


Figura 16. Manganeso extraído por *B. vulgaris* de lodos residuales a diferentes dosis

Calcio (Ca)

Referente a Calcio, este elemento presentó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$), el testigo superó a los demás tratamientos, siendo el T4 el que tuvo una menor extracción de este mineral, los tratamientos T1 y T5 presentaron valores de 2.62 y 2.78 % respectivamente (Figura 17). De manera similar al manganeso, el contenido de calcio se comporta inversamente proporcional a la cantidad de lodo residual aplicado. El carbonato de calcio es un compuesto que se puede encontrar en los lodos residuales y que no ha sido aprovechado, aunado a que se desconoce el porcentaje en que puede llegar a encontrarse (Manzano, 2017); sin embargo en el mismo año Ortíz Cruz (2017) reportó únicamente el 2% de calcio en un bioabono que fue obtenido a partir de un lodo residual. Siguiendo la hipótesis aplicada al elemento manganeso, podemos indicar que los resultados obtenidos se pueden deber en gran parte al contenido de calcio del suelo y no precisamente del lodo residual. Cabe mencionar que la acelga es una hortaliza rica en este mineral teniendo 113 %, seguido del fósforo con 30 % (Avalos Ticona, 2008).

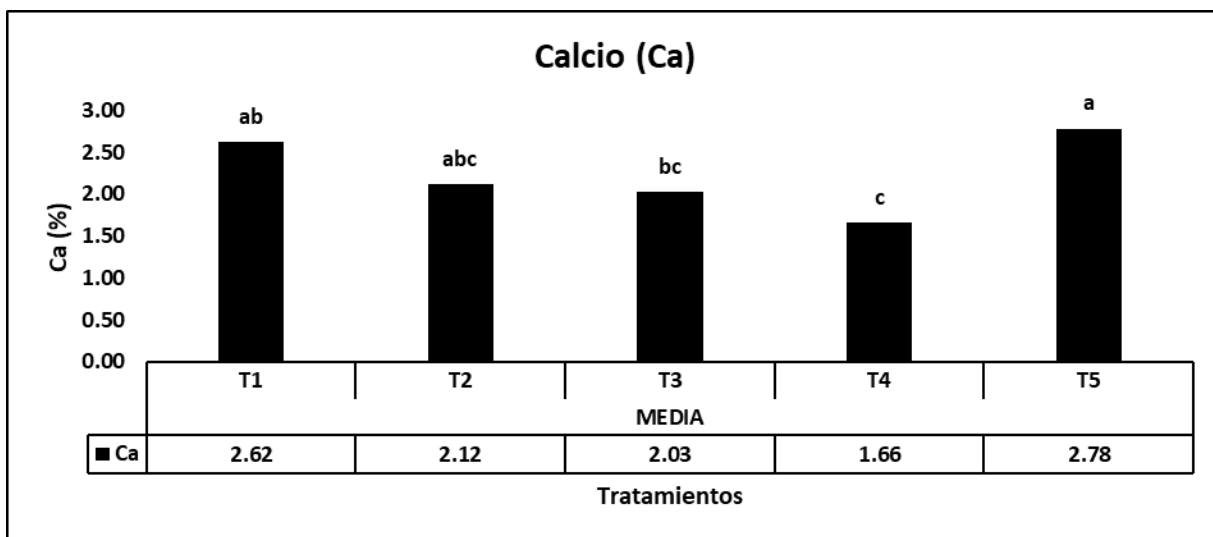


Figura 17. Calcio extraído por *B. vulgaris* de lodos residuales a diferentes dosis

Sodio (Na)

En el elemento sodio no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$), pero si hubo diferencias numéricas. La mayor absorción se presentó en el tratamiento T1 extrayendo 7.72 %, lo que indica que el tratamiento rebaso al testigo con solo 1.6%. Claudia Gallego (2016) menciona que la biodisponibilidad de sodio está estrechamente asociada a la naturaleza salina de los suelos, concluyendo una mayor asimilación de Na en dónde las concentraciones de lodo son más bajas. Lodos estabilizados alcalinamente muestran valores cercanos a 5 % (Campos *et al.*, 2009), ligeramente similar al T4, tratamiento con mayor cantidad de lodo residual en la presente investigación, adjudicando el sodio al contenido mineral del suelo utilizado.

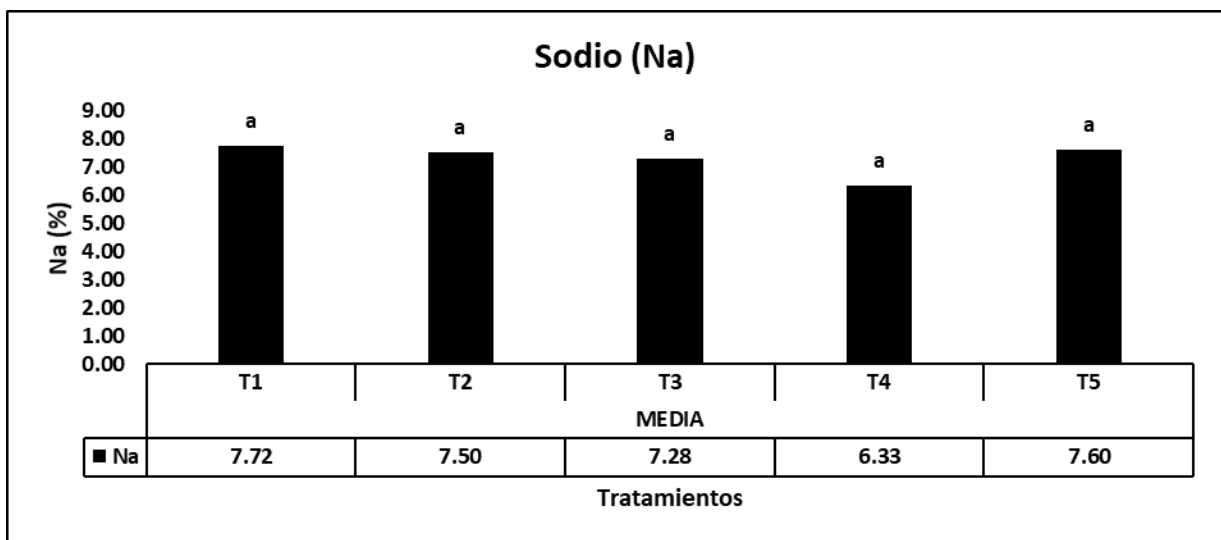


Figura 18. Sodio extraído por *B. vulgaris* de lodos residuales a diferentes dosis

Magnesio (Mg)

De acuerdo con los resultados obtenidos de Mg, no se observó diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$), sin embargo, la mayor concentración de Mg en plantas de acelga se presentó en el T2. El tratamiento T2 presentó valor de 4.14 %, lo que indica que este tratamiento sobresalió respecto al testigo en un 2.5% (Figura 19). En ambientes salinos, la deficiencia de K^+ puede provocar una disminución en la absorción de Mg^{2+} (Que *et al.*, 2012), lo cual coincide con la presente investigación al ser los tratamientos T2 y T5 los que menor cantidad de potasio extraído presentaron. Determinándolo así como un factor que impide la extracción de Magnesio por la planta, tomando en cuenta que la absorción de metales aumenta al incrementarse la concentración total de metales disponibles en los suelos.

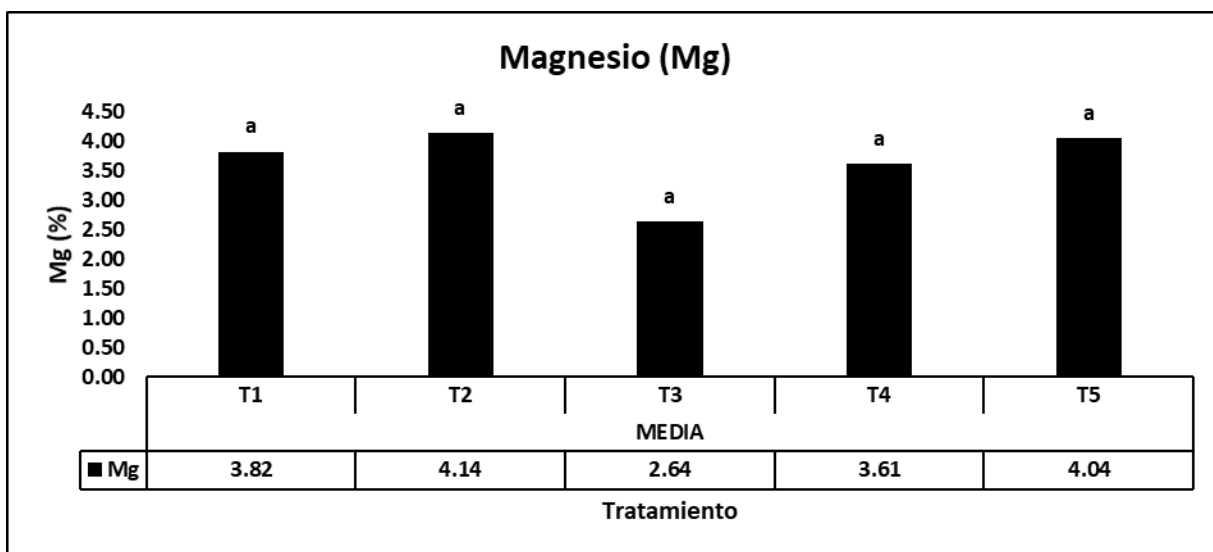


Figura 19. Magnesio extraído por *B. vulgaris* de lodos residuales a diferentes dosis

Fosforo (P)

Los valores obtenidos de P, no muestran diferencia grupal, pero si numérica ($p > 0.05$) entre los tratamientos analizados, la mayor extracción de P se presentó en el T1 y T3, con un valor de 0.82 y 0.63 % respectivamente (Figura 20).

Los microorganismos que habitan en la rizósfera juegan un papel importante en la degradación de la materia orgánica, componente importante en la composición del suelo al dar estabilidad estructural, uniéndose a las arcillas y formando el complejo de cambio, fomentando la penetración del agua y su retención (Julca *et al.*, 2006). Los metabolitos generados de esta degradación son absorbidos por las plantas junto con nitrógeno, fósforo y otros minerales (Garbisu *et al.*, 2007), resultando la extracción de P mejor en suelos ricos en materia orgánica ya que la transformación de la misma funciona como medio soluble y asimilable de P en la planta.

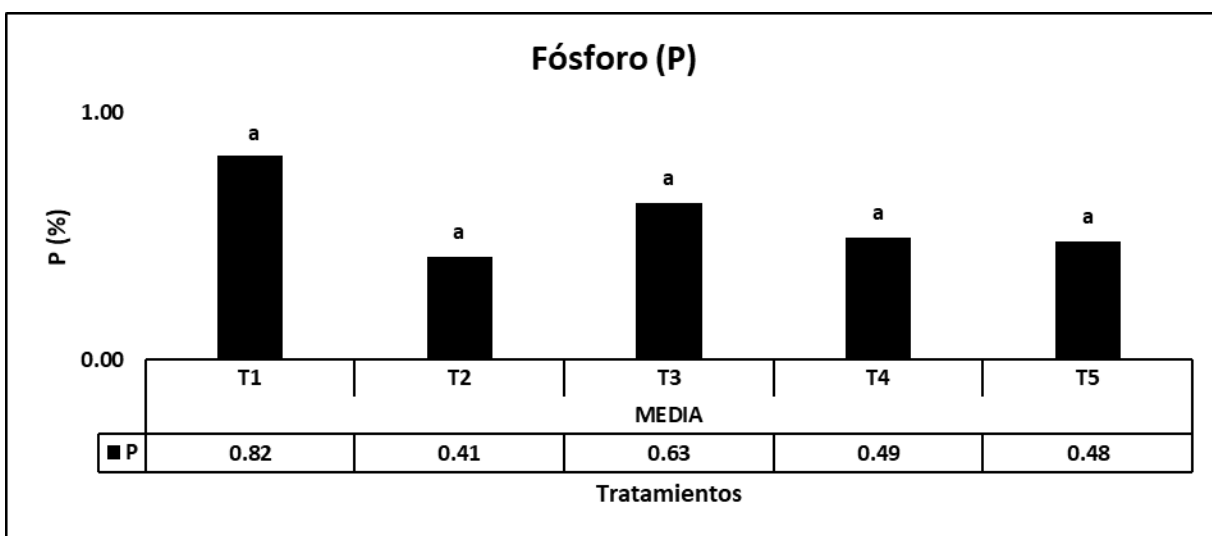


Figura 20. Fósforo extraído por *B. vulgaris* de lodos residuales a diferentes dosis

Corte II

Los resultados del análisis de varianza (ANVA) del Corte II mostraron diferencias significativas para las variables Zinc (Zn), Potasio (K), Hierro (Fe), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Manganeso (Mn), Calcio (Ca), Sodio (Na) y Magnesio (Mg) ($\rho < 0.05$) entre tratamientos (Cuadro 5). Los resultados obtenidos del ANVA no mostraron diferencias significativas ($\rho > 0.05$) en la variable Fosforo (P), entre tratamientos, numéricamente se observó que el T2 y T3 sobresalieron en esta variable.

Cuadro 5. Minerales presentes en lodos residuales extraídos por *Beta Vulgaris* en el corte 2

Corte II

Tratamiento	Zn	K%	Fe	Cu	Pb	Mn	Ca%	Na%	Mg%	P%
Unidades	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%	%
T1	231.79 a	4.41 c	255.71 b	28.93 b	45.30 a	138.96 b	2.14 ab	5.68 ab	1.47 a	0.30 a
T2	245.52 a	9.49 a	577.11 a	30.99 b	46.65 a	146.26 b	2.62 a	7.10 a	1.26 a	0.35 a
T3	235.68 a	7.69 ab	211.07 b	18.58 b	26.16 c	50.85 c	1.55 ab	4.51 b	0.73 b	0.31 a
T4	188.64 a	5.15 bc	190.28 b	25.58 b	42.44 ab	54.82 c	1.55 ab	5.11 b	0.73 b	0.25 a
T5	47.04 b	4.75 c	279.59 b	75.98 a	31.36 bc	194.76 a	1.48 b	4.64 b	0.71 b	0.20 a
C.V. (%)	18.99	16.51	23.75	19.22	12.31	9.25	22.54	13.28	12.71	32.82

C.V.(%) = Coeficiente de variación en por ciento

Zinc (Zn)

Los resultados de Zinc, muestran mayor extracción en el T2 teniendo diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) ya que superó en un 400% al testigo en la cantidad extraída (Figura 21), aún así, durante el Corte I se tuvo una mayor cantidad de zinc extraído.

Raiesh *et al.*, (2008) encontraron que en hortalizas como *Brassica oleracea*, *Abelmoschus esculentus* y *Beta vulgaris*, es el Zn quien mayor concentración presenta por fitoextracción. Este elemento es esencial para las plantas y animales (Caviedes *et al.*, 2015) y no refleja toxicidad sino hasta los 350 mg kg^{-1} , por lo que las cantidades extraídas no alcanzan los niveles mencionados y por ello las plantas no mostraron síntomas característicos como clorosis o crecimiento reducido de la planta (Casierra y Poveda, 2005). Así, esta investigación demuestra que *Beta vulgaris* tiene mejor respuesta de extracción de Zinc en suelos con menor concentración de lodo, siendo la asimilación más rápida.

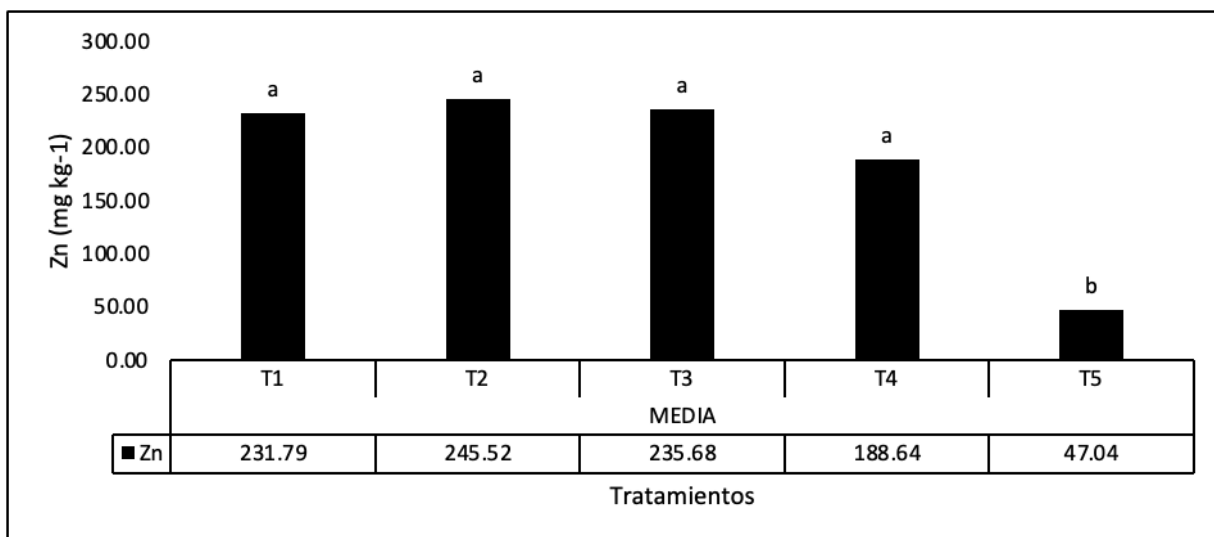


Figura 21. Zinc extraído por *B. vulgaris* de lodos residuales a diferentes dosis.

Potasio (K)

De manera gráfica, se presentan los valores 9.49 y 7.69 %, de T2 y T3 respectivamente, que obtuvieron mejores resultados de extracción que el testigo, el cual tiene un valor de 4.76 % (Figura 22). Alam (1999) sugiere que la salinidad puede tener un efecto estimulador en la concentración de K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . Así, durante la extracción de K, el medio salino influyó en la asimilación en la planta, ya que durante este segundo corte el tratamiento que tuvo mayor extracción en sodio en la planta fue el T2, coincidiendo así que, a mayor cantidad de sodio extraído (figura 28), mayor es la concentración de potasio en el mismo tratamiento.

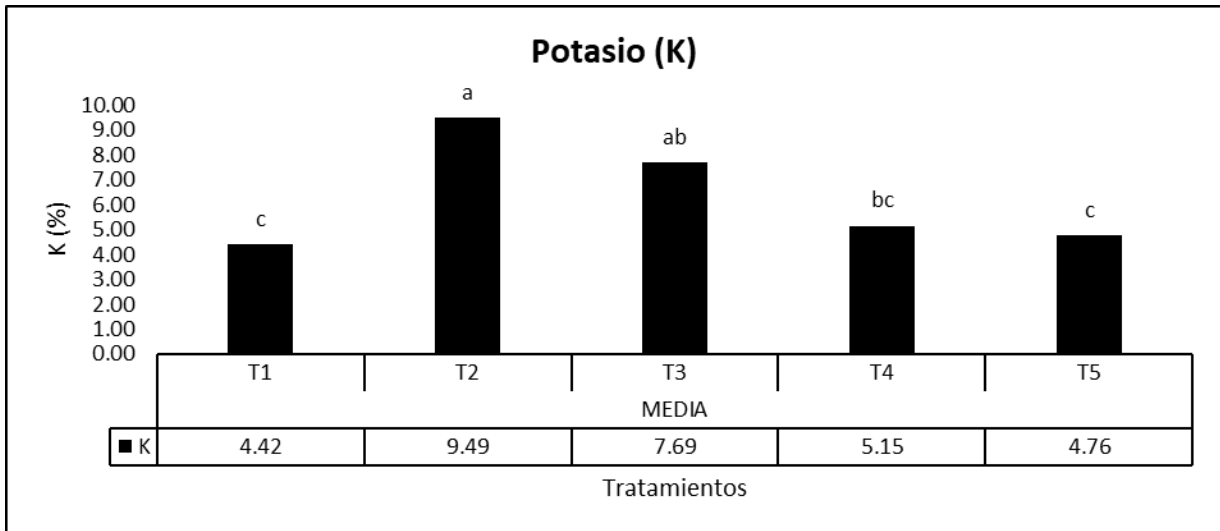


Figura 22. Potasio extraído por *B. vulgaris* de lodos residuales a diferentes dosis

Hierro (Fe)

Se observó que el tratamiento T2, presenta valores de 577.11 mg kg⁻¹, superando al testigo en un 106.4% (Figura 23). La variable Fe presentó diferencias estadísticamente significativas ($\rho < 0.05$).

Este mineral es considerado como un microelemento ya que las cantidades necesarias que requieren las plantas son bajos, en maíz (por ejemplo) una concentración de 350 ppm se considera elevada, provocando estragos en su desarrollo y rendimientos (Lora Silva, 2007). Valores superiores en plantas de acelga podrían afectar su desarrollo ya que se tienen valores registrados de 18 mg kg⁻¹ en el contenido nutrimental de esta hortaliza (Macías *et al.*, 2003) dando así una idea del requerimiento que ocupa. Se puede observar una relación entre el hierro y cobre en este segundo corte, pues a mayor cantidad de Fe (T2), el cobre tiende a disminuir (T2), lo cual se refleja un resultado positivo ya que, de ser contrario, la fotosíntesis podría verse afectada como resultado de la foto inhibición, provocada por una deficiencia de hierro la cual es inducida por mayor contenido de cobre, y con ello afectar el desarrollo de la planta (Villegas *et al.*, 2015).

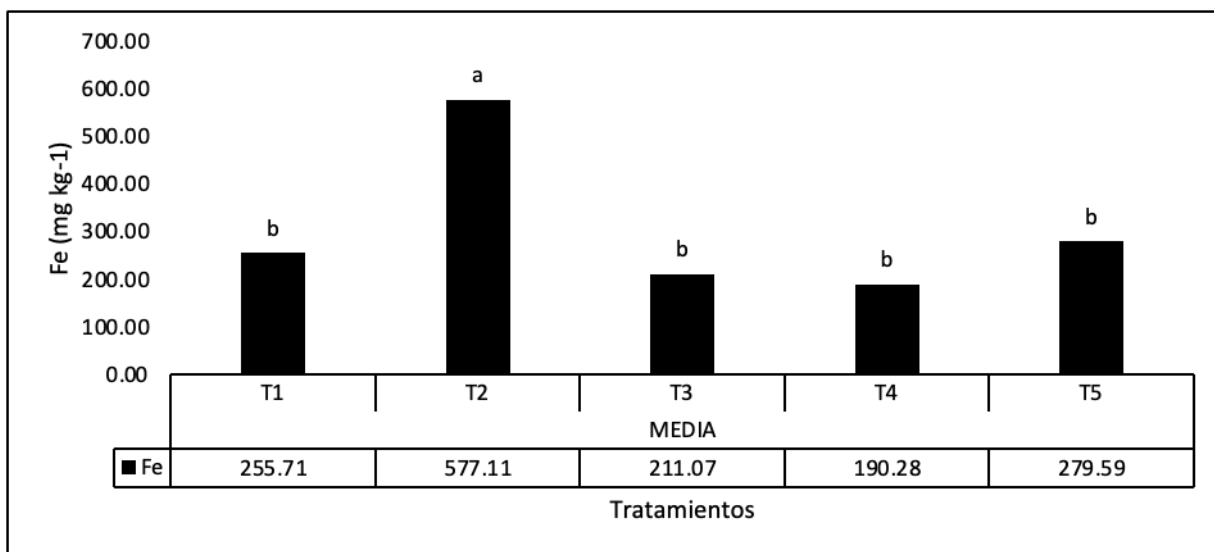


Figura 23. Hierro extraído por *B. vulgaris* de lodos residuales a diferentes dosis

Cobre (Cu)

De acuerdo a los resultados el mayor contenido de Cu se presentó en el tratamiento testigo con un valor de 75.98 mg kg^{-1} , habiendo diferencia significativa ($p < 0.05$) entre tratamientos (Figura 24).

Para el segundo corte en este elemento se puede observar que aún cuando el T3 fue el de mayor contenido en el primer corte, en este segundo fue el de menor cantidad extraída, dejando ver que una vez que alcanza niveles altos de extracción en su primera etapa, el proceso tiende a llevarse a cabo más lento en presencia de lodos residuales, por el contrario, en el tratamiento testigo la extracción en ambos cortes fue elevada, llegando incluso a superar hasta en 150% la cantidad extraída en el corte 2 comparado con el corte 1. Khalil *et al.* (2006) encontraron resultados similares al evaluar contenido de Cu a lo largo de 180 días, en donde el contenido de cobre en suelos contaminados tiende a aumentar a lo largo del tiempo en hojas de *Leucaena leucocephala*.

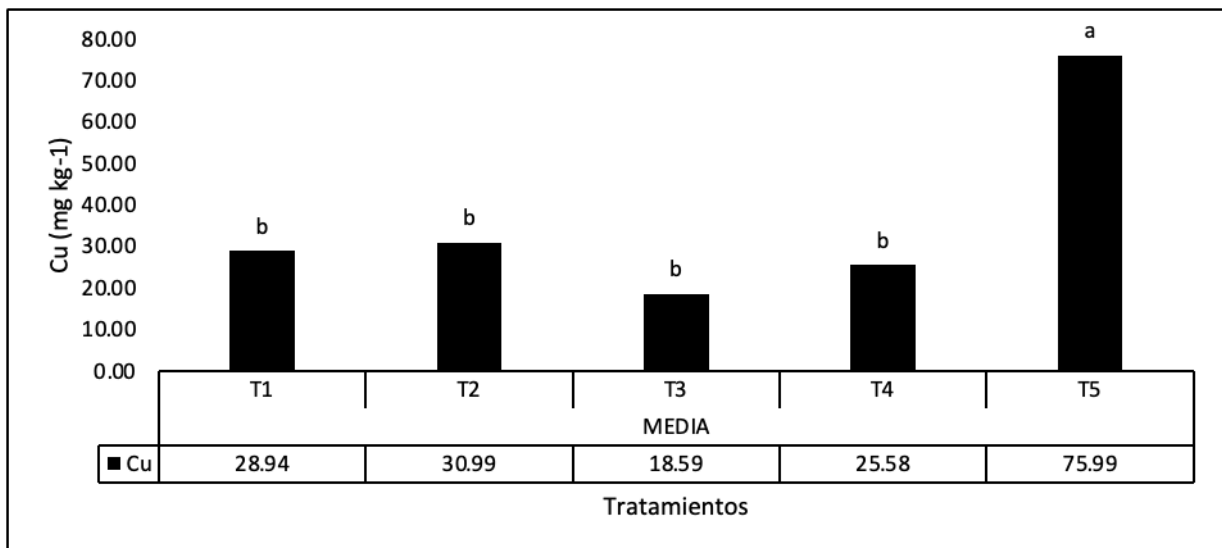


Figura 24. Cobre extraído por *B. vulgaris* de lodos residuales a diferentes dosis

Plomo (Pb)

Este elemento presenta diferencias estadísticamente significativas ($\rho < 0.05$) siendo el T2 el que presenta mayor contenido de Pb en este corte. El tratamiento T2 y T1 presentan valores de 46.65 y 45.30 mg kg⁻¹, manteniéndose por arriba del testigo en un 33% y 31% respectivamente (Figura 25). Coincidiendo con Ortiz Cano *et al.* (2009), se aprecia que la concentración de Pb en hoja, tallo y raíz de plantas de quelite (*A. hybridus* L.) tiende a incrementarse conforme aumentó su edad, desarrollo y crecimiento en macetas con suelo contaminado con 300 mg kg⁻¹ de Pb, con y sin la adición de micorriza, por lo que el acumulamiento de Pb es mayor en *Beta vulgaris* conforme a la edad de la planta expuesta en el lodo residual. Durante el corte I el tratamiento T2 presentó el valor más bajo, en este segundo corte fue este tratamiento el que mayor extracción tuvo de plomo, en el resto de los tratamientos la mayor extracción fue dada durante el primer corte, por lo cual podemos dilucidar que hay un límite de extracción ya que en el corte dos la cantidad extraída fue menor, y en el tratamiento T2 podemos suponer que intentó alcanzar el límite al extraer mayor cantidad de este metal, siendo relevante este resultado ya que el plomo es de los metales más tóxicos. La Unión Europea permite contenidos en hortalizas hasta en 0,10 mg kg⁻¹ peso fresco, evidenciando así que en estas condiciones de producción no es saludable su consumo (Vega y Salamanca, 2015).

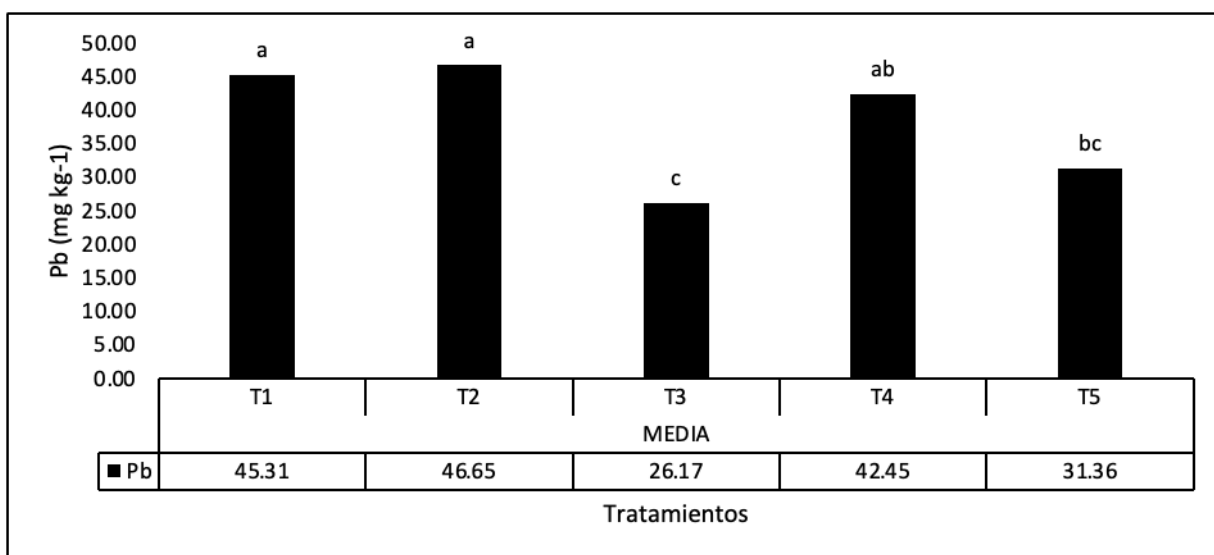


Figura 25. Plomo extraído por *B. vulgaris* de lodos residuales a diferentes dosis

Manganeso (Mn)

En los resultados para el Mn a pesar de que los tratamientos T1 y T2 muestran una favorable extracción, el testigo lo supero por 40% y 33% respectivamente. Observando la misma tendencia que en el corte uno. La mayoría del manganeso es absorbido por las plantas como Mn^{2+} (Gómez, 2014). Resultando, entre mayor sea la concentración de lodo, menor será la asimilación de Mn por la disponibilidad del elemento en suelos con lodo residual, siendo la extracción de Mn más lenta. La cantidad de manganeso extraído en su mejor tratamiento se considera buena tomando en cuenta que la acelga fresca cuenta con cantidades de apenas 33 mg kg^{-1} (Costa *et al.*, 2003).

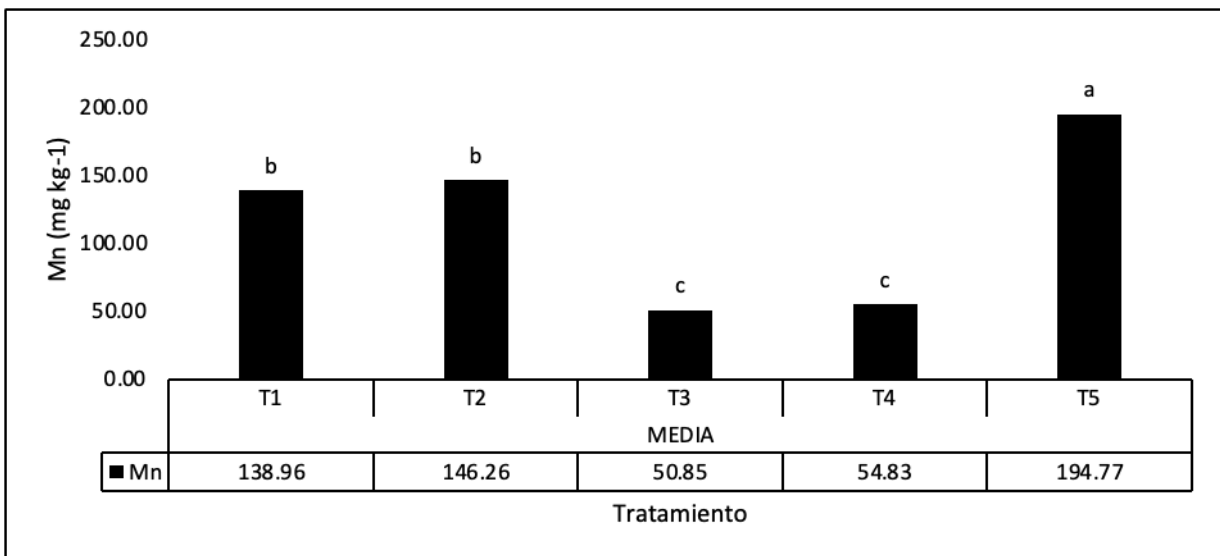


Figura 26. Manganeso extraído por *B. vulgaris* de lodos residuales a diferentes dosis

Calcio (Ca)

En el cuadro 5 aparece la comparación de medias la cual mostró diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) para el elemento Calcio en donde la extracción más baja se mostró en el testigo, con 1.48 mg kg^{-1} . De manera gráfica (Figura 27), se observa que los tratamientos T1 (2.15 %) y T2 (2.62 %) presentaron los mayores valores, indicando que sobresalieron respecto al testigo en un 31% y 43.5% respectivamente. Téllez *et al.*, (2018) reporta el contenido porcentual de calcio en lodo residual crudo, expresando únicamente el 0.08%, valores bajos de este mineral, asumiendo que una fracción es proporcionada por el suelo y otra (muy pequeña) por el lodo. En ocasiones la cantidad de calcio puede elevarse debido a que los lodos residuales son higienizados a través de encalamientos, incrementando la concentración del mineral (Medina Tiznado, 2003).

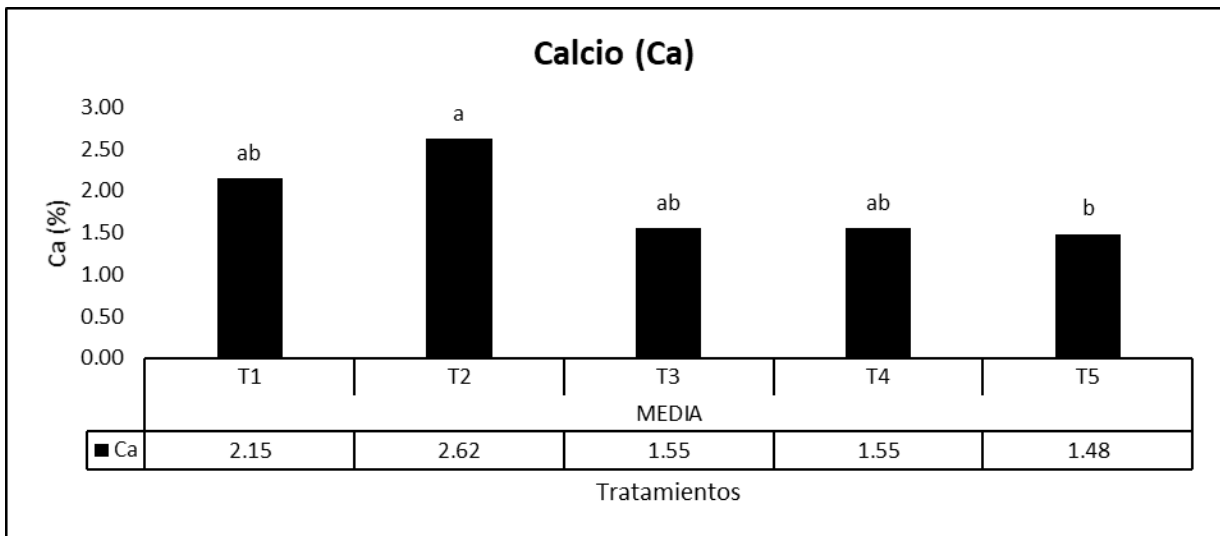


Figura 27. Calcio extraído por *B. vulgaris* de lodos residuales a diferentes dosis

Sodio (Na)

A diferencia del corte I, en este corte si hubo diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) para la variable sodio, el tratamiento T2 es el tratamiento con mayor cantidad de sodio extraído (7.11 %), superando en un 57 % al T3, quien tuvo la menor cantidad de extracción (Figura 28).

Este elemento es uno de los principales en el cultivo de acelga, luego del potasio y magnesio (Candia y Quiroga, 2018). El incremento del crecimiento en plantas de acelga promovida por Na^+ se explica por un efecto ahorrador sobre el K^+ ; sin embargo, el crecimiento de esta especie también se incrementa por la presencia de un contenido suficiente de K^+ disponible (Jennings, 1976), corroborando esta relación con los resultados obtenidos en potasio, donde la extracción fue también la mayor en el mismo tratamiento.

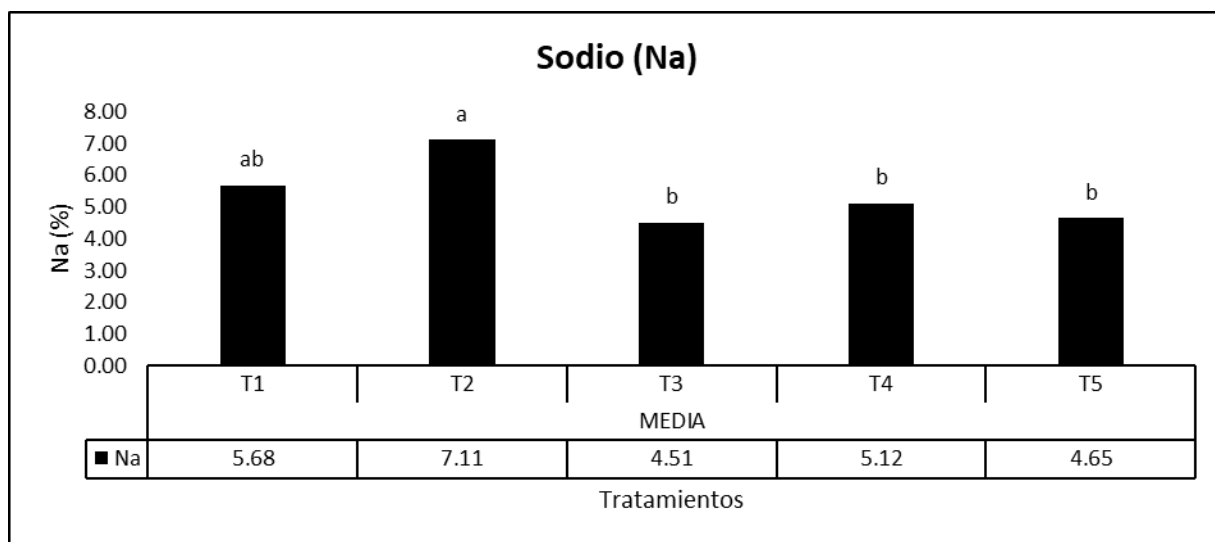


Figura 28. Sodio extraído por *B. vulgaris* de lodos residuales a diferentes dosis

Magnesio (Mg)

A diferencia del primer corte, el corte II mostró dos grupos en donde se exhiben diferencias estadísticamente significativas para este elemento ($p < 0.05$), en donde el tratamiento T1 presenta el valor más alto (1.48 %) seguido del T2 con un valor de 1.26 %, logrando un 108% y un 77.5% más en cantidad extraída que el testigo respectivamente (Figura 29).

El magnesio es componente de la clorofila y es capaz de regular su metabolismo incluso en condiciones de salinidad (Ochoa Espinosa, 2019), lo cual se relaciona con el sodio que, de igual manera, sus resultados se agruparon en dos grupos en donde los tratamientos fueron los mismos. Mismo caso sucedió con el calcio, que es de los elementos más competitivos con el magnesio, sin embargo, la relación fue proporcional y no inversamente como se esperaba, pues Bernstein y Hayward (1958) exponen que altas concentraciones de calcio en el sustrato resultan en un aumento de este elemento en la hoja, con reducción de las concentraciones de magnesio.

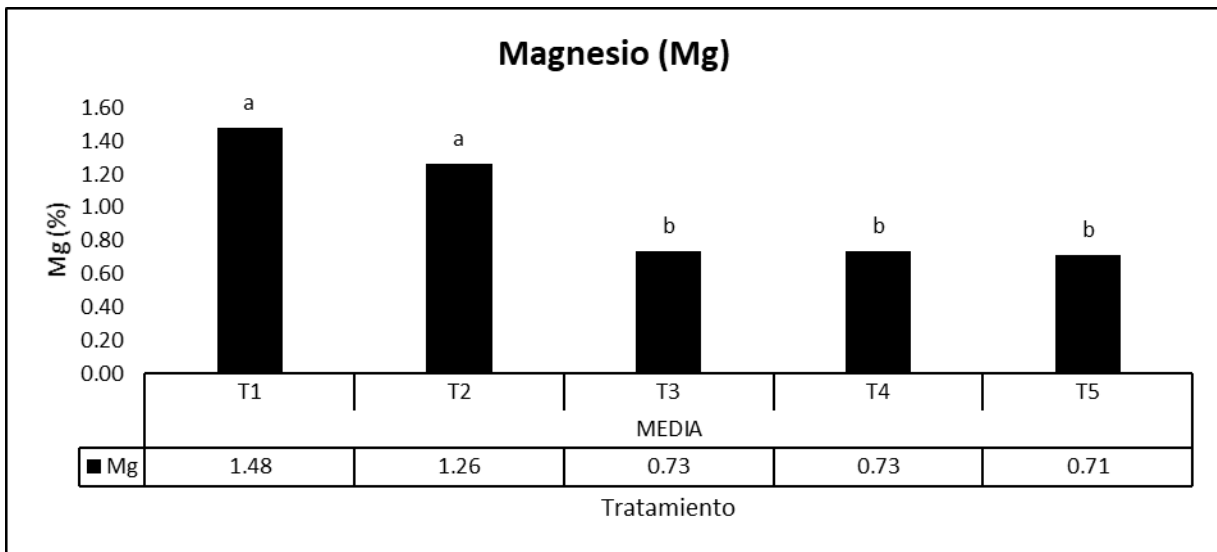


Figura 29. Magnesio extraído por *B. vulgaris* de lodos residuales a diferentes dosis

Fosforo (P)

El segundo corte de este mineral, del mismo modo que en el primero, no hubo diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$), pero si hubo diferencias numéricas entre tratamientos. Cabe resaltar que en el corte II se tuvieron valores menores de absorción respecto del corte I. El tratamiento testigo fue el que presentó la menor cantidad extraída (0.21 %), en tanto que el T2 lo superó en un 71.4% (Figura 30).

Un factor importante a conocer del fósforo es que en el suelo se encuentra en la materia orgánica y junto con el nitrógeno determinan el crecimiento vegetal (Fassbender, 1994). Los niveles dados para este mineral en todos los tratamientos y en ambos cortes han sido bajos, pudiéndose deber a que la principal contribución a la dinámica de este mineral en el suelo se da por procesos de mineralización-inmovilización microbianos que poseen un papel relevante especialmente en la rizósfera (Cerón y Aristizábal, 2012).

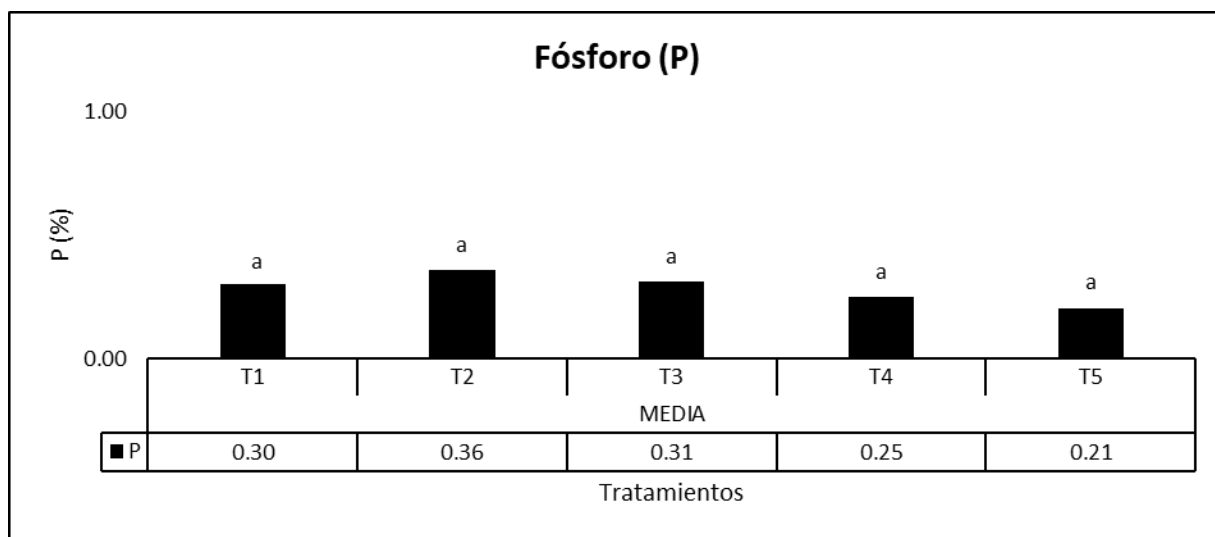


Figura 30. Fósforo extraído por *B. vulgaris* de lodos residuales a diferentes dosis

CONCLUSIONES

Los minerales con mayor cantidad extraída en ambos cortes fueron el zinc, hierro y manganeso, mientras que los de menor cantidad fueron fósforo, magnesio y calcio.

El zinc, cobre y manganeso incrementaron el contenido de extracción del primer corte al segundo, en tanto que en el resto de las variables disminuyó su extracción.

En el primer corte, el plomo, manganeso y calcio tuvieron mayor cantidad extraída en suelos que no tuvieron incorporación de lodos residuales, en el segundo corte se mantuvo en igual condición el manganeso y se comporto de esta manera el cobre.

Durante el primer corte los tratamientos T1 y T5 mostraron mayor cantidad de contenido extraído de minerales, en tanto que para el segundo corte se mantuvo una extracción superior en los tratamientos T1, T2 y T5.

LITERATURA CITADA

- Adriano Anaya, M., Jarquín Gálvez, R., Hernández Ramos, C., Figueroa, M., y Monreal Vargas, C. (2011). Biofertilización de café orgánico en etapa de vivero en Chiapas, México. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 2 (3), 417-431.
- Amador Díaz, Anisley Veliz, Lorenzo, Eliet Bataller y Venta, Mayra. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, Vol. 46, pp. 1-10.
- Armenta-Bojórquez, A., García-Gutiérrez, C., Camacho-Báez, J., Apodaca-Sánchez, M., Gerardo-Montoya, L., y Nava-Pérez, E. (2010). Biofertilizantes en el desarrollo agrícola de México. *Ra Ximhai*, 6 (1), Pp 51-56.
- Avalos Ticona, F. G. (2008). Evaluación de dos variedades de acelga (*Beta vulgaris* Var. Cicla L.) bajo dosis de abobamiento con biol porcino en carpa solar. La Paz, Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés.
- Campos Medina, Eduardo, García Rojas, Norma y Velásquez Rodríguez, Alma y García Fabila, Magdalena (2009). Análisis básico del reúso de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales en suelos de pradera del parque nacional nevado de Toluca. Quivera. *Revista de Estudios territoriales*, 11 (2), 35-51.
- Candia Pacheco, L. R., Quiroga Sossa, M. (2018). Producción de acelga (*beta vulgaris*) en sistema vertical a diferentes distancias en ambiente protegido. *Revista de Investigaciones e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 5, 101 - 116.
- Casierra-Posada, Fánor, & Poveda, Jeimy (2005). La toxicidad por exceso de Mn y Zn disminuye la producción de materia seca, los pigmentos foliares y la calidad del fruto en fresa (*Fragaria sp. cv. Camarosa*). *Agronomía Colombiana*, 23(2),283-289.
- Castañeda Villanueva, A. y Flores López, H. E. (2013). Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante plantas típicas en Los Altos de Jalisco,

México, en Paakat: Revista de Tecnología y Sociedad. Año 3, núm. 5, septiembre 2013-febrero 2014

- Caviedes Rubio, D. I., Muñoz Calderón, R. A., Perdomo Gualterio A., Rodríguez Acosta, D., Sandoval Rojas, I. J. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Revista Ingeniería y Región*, 1, 73-90.
- Cerón Rincón, L. A., Aristizábal Gutiérrez, F. A. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Rev. Colomb. Biotecnol.*, XIV, 285-295.
- Chaveli Chávez, P., Caballero Alvarez, R., & Vento Pérez, M. (2014). Uso del residual sólido de biogás para la producción de hortalizas en huertos intensivos. *Agrisost*, 20(1), 28-34. Recuperado a partir de <https://revistas.reduc.edu.cu/index.php/agrisost/article/view/339>
- Chávez Porras, A., Rodríguez González, A. (2011). Análisis químico y biológico de biosólidos sometidos a sistema de lombricultura como potencial abono orgánico. *NOVA – Publicación Científica en Ciencias Biomédicas*, 9, 53 - 59.
- Cupe Flores, Beatriz Esther, y Juscamaita Morales, Juan Gabriel. (2018). Tratamiento de lodos residuales de una industria cervecera a través de fermentación homoláctica para la producción acelerada de abono orgánico. *Ecología Aplicada*, 17(1), Pp. 107-118.
- Delgadillo-López, Angélica Evelin, González-Ramírez, César Abelardo, Prieto-García, Francisco, Villagómez-Ibarra, José Roberto y Acevedo-Sandoval, Otilio. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14(2), Pp 597-612
- Donoso, S., Peña Rojas, K., Galdames, E., Pacheco, C., Espinoza, C., Durán, S., y Gangas, R. (2016). Evaluación de la aplicación de biosólidos en plantaciones de eucalyptus globulus en Chile central. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, Vol. 48 (2), Pp 107-119.

- Durán Acosta, L.F., M.J. Ladera Hernández (2016). Biorremediación de suelos contaminados por organoclorados mediante la estimulación de microorganismos autóctonos, utilizando biosólidos. NEXO Revista Científica, Vol. 29, No. 01, Pp. 22-28.
- Escalante-Canizal, Samantha, Márquez-Benavides, Liliana, Baltierra-Trejo, Eduardo, Saucedo-Martínez, Blanca Celeste y Sánchez-Yáñez, Juan Manuel. (2017). Biorremediación y fitorremediación de un suelo impactado por aceite residual automotriz con *Helianthus annuus* y *Burkholderia vietnamiensis*. Journal of the Selva Andina Research Society, 8(2), Pp 104-114.
- Fernández Cirelli, Alicia. (2012). El agua: un recurso esencial. Química Viva, Vol. 11, núm. 3, Pp. 147-170.
- Flores-Hernández, A. y López-Ariza, B. (2009). Fitoextracción de plomo y cadmio en suelos contaminados usando quelite (*Amaranthus hybridus* L.) y micorrizas. Revista Chapingo. Serie Horticultura, 15(2), 161-168
- Galaviz Lozano, A. D., y Trejo Calzada, R. (2011). Uso de *Cenchrus ciliaris* L. y *Setaria verticillata* L. en la fitoestabilización de suelos contaminados con plomo y cadmio. Revista Chapingo Serie Zonas Áridas, Vol 1, Pp 27-31.
- Gilsanz, J. C, Leoni, C., Aranda, S., Schelotto, F. y Acuña, A. (2012). Uso agrícola de los lodos urbanos. Revista INIA, Vol 1, Pp 1-5.
- Gilsanz, Juan Carlos, Leoni, Carolina, Schelotto, Felipe y Acuña, Ana. (2013). Uso potencial de los lodos urbanos en la producción agrícola. Agrociencia Uruguay, 17(2), Pp 1-10.
- González Flores, E., Ramos Barragán, J., Tornero Campante, M., y Murillo Murillo, M. (2017). Evaluación de dosis de biosólidos urbanos en maíz bajo condiciones de invernadero. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, Vol. 8 (1), Pp 117-130.
- González Flores, E., Tornerocampante, M., Sandoval Castro, E., Pérez Magaña, A. y Gordillo Martínez, A. (2011). Biodisponibilidad y fraccionamiento de metales

pesados en suelos agrícolas enmendados con biosólidos de origen municipal. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, Vol. 27 (4), Pp 291-301.

González Flores, Eduardo, Sandoval Castro, Engelberto y Pérez Magaña, Andrés. (2014). Biosólidos en la producción de maíz: impacto socioeconómico en zonas rurales del municipio de Puebla. *Estudios Sociales (Hermosillo, Son.)*, Vol. 22(43), Pp 61-86.

González González, María Isabel y Chiroles Rubalcaba, Sergio. (2011). Uso seguro y riesgos microbiológicos del agua residual para la agricultura. *Revista Cubana de Salud Pública*, Vol. 37(1)

Grageda Cabrera O., Díaz Franco, A., Peña Cabriales, J. y Vera Nuñez, J. (2012). Impacto de los biofertilizantes en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, Vol. 3 (6), Pp 1261-1274

Hernández Valencia, Ismael, Navas, Gabriela, & Infante, Carmen. (2017). FITORREMEDIACIÓN DE UN SUELO CONTAMINADO CON PETRÓLEO EXTRA PESADO CON *Megathyrus maximus*. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 33(3), 495-503. <https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.03.12>

Julca-Otiniano, Alberto, Meneses-Florián, Liliana, Blas-Sevillano, Raúl, y Bello-Amez, Segundo. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia (Arica)*, 24(1), 49-61.

Khalil Gardezi, Abdul, & Barcelo-Quintal, Icela D., & Cetina-Alcalá, Víctor Manuel, & Laure Bussy, Anne, & Pérez-Nieto, Joel, & Borja-Salin, Manuel A. (2006). Absorción de cobre y características de *Leucaena leucocephala* asociada con *Glomus spp.* y *Rhizobium* en suelo contaminado del Río Lerma, México. *Terra Latinoamericana*, 24 (3),347-354.

Landeros-Márquez, Oscar, Trejo-Calzada, Ricardo, Reveles-Hernández, Manuel, Valdez-Cepeda, Ricardo David, Arreola-Ávila, Jesús Guadalupe, Pedroza-Sandoval, Aurelio y Ruíz-Torres, José (2011). Uso potencial del Huizache

(*Acacia Farnesiana* L. Will) en la fitorremediación de suelos contaminados con plomo. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, Vol. XVII, Pp 11-20.

Llano, Biviana A, Cardona, Jhon F, Ocampo, David y Ríos, Luis A. (2014). Tratamiento fisicoquímico de las aguas residuales generadas en el proceso de beneficio de arcillas y alternativas de uso de los lodos generados en el proceso. Información Tecnológica, Vol. 25 (3), Pp 73-82.

Llugany, M., Tolrà, R., Poschnrieder, C., y Barceló, J. (2007). Hiperacumulación de metales: ¿una ventaja para la planta y para el hombre? Ecosistemas, 16(2), Pp 1-6

Lora Silva., R. (2007). Contaminación por elementos menores y posibles soluciones. Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica, 10, 5-20.

Lugo, Jorge, Águila, Pedro Del, Vaca, Rocío, Casas Hinojosa, Idalia, y Yáñez Ocampo, Gustavo. (2017). Abono orgánico elaborado con lodo residual y estiércol equino a través de vermicomposteo: una propuesta como mejorador de suelos. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, Vol. 33(3), Pp 475-484

Apáez Barrios, Patricio, & Escalante Estrada, José Alberto Salvador, & Sosa Montes, Eliseo, & Rodríguez González, María Teresa, & Apáez Barrios, Maricela (2014). Fenología, producción y calidad nutrimental del grano de frijol chino en función de la biofertilización y fertilización foliar. Interciencia, 39(12),857-862.

Macías de Costa, S., Montenegro, M. A., Arregui, T., Sánchez de Pinto, M.I., Nazareno, M. A., López de Mishima, B. (2003). Caracterización de acelga fresca De Santiago del Estero (Argentina). Comparación del contenido de nutrientes en hoja y tallo. Evaluación de los carotenoides presentes. Cienc. Tecnol. Aliment., Campinas, 23, 33 - 37.

- Manzano Vela, D. R. (2017). Desarrollo de un método para la recuperación de carbonato de calcio de los lodos residuales en la empresa Ecuamarmol. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Martínez Prado, Adriana, Pérez López, Ma. Elena, Pinto Espinoza, Joaquín, Gurrola Nevárez, Blanca Amelia, y Osorio Rodríguez, Ana Lilia. (2011). Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, Vol. 27 (3), Pp 241-252.
- Melo Cerón, A., Rodríguez González, A., y González Guzmán, J. (2017). Manejo de biosólidos y su posible aplicación al suelo, caso Colombia y Uruguay. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, Vol. 8(1), Pp 217 - 226.
- Medina Tizado, J. M. (2003). Lodos residuales como alternativa para la recuperación de suelos. Saltillo, Coahuila: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Morales García, E. D. (2020). Recuperación de hierro contenido en lodos residuales provenientes de la industria de la acería. Quito, Ecuador: Universidad Central del Ecuador.
- Munive Cerrón, Rubén, Gamarra Sánchez, Gilberto, Munive Yachachi, Yveth, Puertas Ramos, Fernando, Valdiviezo Gonzales, Lorgio y Cabello Torres, Rita. (2020). Absorción de plomo y cadmio por girasol de un suelo contaminado, remediado con enmiendas orgánicas en forma de compost y vermicompost. *Scientia Agropecuaria*, Vol. 11(2), Pp 177-186.
- Negrin Brito, Alejandro, y Jiménez Peña, Yamilé. (2012). Evaluación del efecto agronómico del biosólido procedente de una planta de tratamiento por digestión anaerobia de residuales pecuarios en el cultivo del frijol (*Phaseolus Vulgaris L.*). *Cultivos Tropicales*, 33(2), 13-19
- NOM-004-SEMARNAT-2002 Norma oficial mexicana, protección ambiental. - lodos y biosólidos. - Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

- Ochoa Espinosa, M. F. (2019). Tamaño de hoja y su relación con la fisiología y absorción de minerales de acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla* L.). La Paz, Baja California Sur: Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste, S. C.
- Ortíz Cruz, L. P. (2017). Obtención de bioabono a partir de lodo residual procedente de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Peñarete M., W., Silva Leal, J., Urrutia C., N., Daza T., M., & Torres-Lozada, P. (2013). Efecto de aplicación de biosólidos sobre las propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar. *Acta Agronómica*, 62 (3), Pp 251-260.
- Peña-Salamanca E. J., C. A. Madera-Parra, J.M. Sánchez, J. Medina-Vásquez: Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso *Heliconia Psittacorum* (*Heliconiaceae*). *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 37 (145) Pp 469-481, 2013.
- Potisek-Talavera, María Del Carmen, Figueroa Viramontes, Uriel, González-Cervantes, Guillermo, Jasso Ibarra, Rodolfo y Orona Castillo, Ignacio. (2010). Aplicación de biosólidos al suelo y su efecto sobre contenido de materia orgánica y nutrimentos. *Terra Latinoamericana*, 28(4), Pp 327-333.
- Ramírez Gottfried, Ricardo Israel, García Carrillo, Mario, Álvarez Reyna, Vicente de Paul, González Cervantes, Guillermo y Hernández Hernández, Vicente. (2019). Potencial fitorremediador de la chicura (*Ambrosia ambrosioides*) en suelos contaminados por metales pesados. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(7), 1529-1540.
- Robledo Santoyo, E., Espinosa Hernández, V., Maldonado Torres, R., Rubiños Panta, J., Hernández Acosta, E., Ojeda Trejo, E., y Corlay Chee, L. (2010). Sales solubles y metales pesados en suelos tratados con biosólidos. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16 (2), Pp 241-251.
- Rojas Remis, Rebeca y Mendoza Espinosa, Leopoldo G. (2012). Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. *Producción + Limpia*, 7 (2), Pp 74-94

- Romero Aguilar, Mariana, Colín Cruz, Arturo, Sánchez Salinas, Enrique y Ortiz Hernández, Ma. Laura. (2009). Wastewater treatment by an artificial wetlands pilot system: evaluation of the organic charge removal. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, Vol. 25(3), Pp 157-167.
- Silva Leal, J., Bedoya, D., Torres-Lozada, P. (2013). Evaluación del potencial de aplicación de biosólidos higienizados en el cultivo de rábano. *Acta Agronómica*, 62 (2), Pp 155-164.
- Tarango Rivero, S., Alarcón Herrera, M., Orrantia Borunda, E. (2011). Crecimiento, rendimiento, metales pesados y microorganismos en suelo y frutos de nogal pecanero fertilizados con biosólidos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2 (6), Pp 799-811.
- Téllez-Pérez, Victoria, López-Olguín, Jesús F., Aragón, Agustín, & Zayas-Pérez, María Teresa. (2018). Lodos residuales de Nejayote como sustratos para la germinación de semillas de maíz azul criollo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(3), 395-404. <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.03>
- Torres González, Jorge Alejandro, Benavides Mendoza, Adalberto, Ramírez, Homero, Robledo Torres, Valentín, González Fuentes, José A. y Díaz Núñez, Vicente. (2011). Aplicación de lodo industrial crudo en la producción de *Lilium Sp.* en invernadero. *Terra latinoamericana*, 29(4), Pp 467-476.
- Vega Castro, Daniel & Rivera, Ángela. (2015). Contenidos de plomo en acelga común beta vulgaris L., producida en el contexto de la agricultura urbana (Bogotá, Colombia). *Luna Azul*. 44-53. 10.17151/luaz.2016.42.5.
- Vélez-Carvajal, Nohora Astrid, Melo-Martínez, Sandra Esperanza, Flórez-Roncancio, Víctor Julio. (2014). Comportamiento de Ca, Mg y S en un sistema de cultivo sin suelo para clavel. *Revista chapingo. Serie horticultura*, 20(2), 171-185.
- Villegas-Torres, Oscar Gabriel, Domínguez-Patiño, Martha Lilia, Martínez-Jaimes, Patricia y Aguilar-Cortes, Miguel. (2015). Cobre y Níquel, microelementos

esenciales en la nutrición vegetal. Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias, 2-2:285-295

WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). (2017). informe mundial de las naciones unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos. aguas residuales: El recurso desaprovechado. París, UNESCO.