

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO**



**EXTRACCIÓN DE ELEMENTOS MINERALES POR LA ACELGA REGADA CON
AGUAS RESIDUALES**

Por:

ROSA ANTONIO SANTIAGO

TESIS

Presentada como Requisito Parcial para

Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Febrero de 2015

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISION DE INGENIERIA

EXTRACCIÓN DE ELEMENTOS MINERALES POR LA ACELGA REGADA CON
AGUAS RESIDUALES

POR:

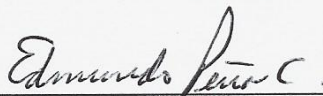
ROSA ANTONIO SANTIAGO

TESIS

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

INGENIERO AGRICOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por:



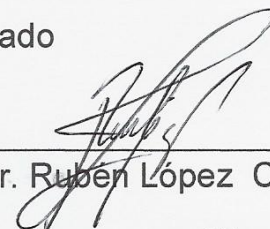
Dr. Edmundo Peña Cervantes

Presidente del H. jurado



M.C. Idalia María Hernández Torres

Sinodal



Dr. Rubén López Cervantes

Sinodal

Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"



Dr. Luis Samaniego Moreno

Coordinador de la División de Ingeniería

Coordinación de
Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Febrero de 2015

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por haberme abierto las puertas de esta mi segunda casa, por haberme formado ya que gracias a esta institución he logrado culminar un objetivo más en la vida. Mil gracias a mi Alma Terra Mater.

Agradezco a todas aquellas personas que hicieron posible de la realización del presente proyecto de investigación, en especial a:

Al Dr. Edmundo Peña Cervantes por compartirme su sabiduría y sobre todo su tiempo y sabios consejos durante mi etapa de estudiante y por ser un excelente guía en la elaboración de este proyecto, mil gracias

A la MC. Idalia María Hernández Torres por su confianza y apoyo que me ha otorgado de manera incondicional, pues me facilito la oportunidad de desarrollarme como estudiante y por su participación en la elaboración de este trabajo.

Al Dr. Rubén López Cervantes por el apoyo para la elaboración de este proyecto

DEDICATORIA

A Dios

Por darme la oportunidad de existir, de vivir, por permitirme despertar día con día, por estar siempre conmigo y no abandonarme a pesar de todo, por sus lecciones de vida, por consentirme el poder vivir esta experiencia única, inigualable e irrepetible, y dejarme culminar una de mis metas en la vida.

A MIS PADRES

Sr. Miguel Antonio Gaona y Sra. Rosa Santiago Hernández, por que han sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores, lo cual me ha ayudado a salir adelante buscando siempre el mejor camino para mí.

A ti mama, doy gracias a Dios por elegirte para mí, por el maravilloso tiempo que anide en tu vientre, por velar mi sueño.

Con profundo agradecimiento a ti papa, por ayudarme a la construcción de mi proyecto de vida y hacer que verdaderamente crea en mí. Gracias papa por tu amor y por tu comprensión, eres quien hizo que todo esto fuera posible, a ti te debo gran parte de la que soy.

A mis hermanas; Manuela y Angélica que están siempre en mi mente y en mi corazón. Gracias por su cariño y apoyo, pues son la fuente de inspiración para ser mejor persona y seguir luchando, mi cariño, respeto y admiración para cada uno de ustedes. Y a mi **hermano Mauricio** por ser una persona trabajadora y por el apoyo moral, por sus motivaciones y buen sentido del humor que muchas veces me hizo reír con sus locuras los quiero mucho

Amigos; Claudio, Josefa, Delia, gracias por su apoyo y compañía que hicieron que mi estancia en la universidad fuera mas agradables.

A mi pareja **Onofre pastrana Ortiz** por que ha sabido darme su amor, apoyo y comprensión incondicional en esta aventura de mi vida, mil gracias por ser mi inspiración y fortaleza para continuar, te quiero mucho.

A la M.C. Martha Ortega Rivera, por su amistad, fe y confianza desinteresada que deposito en mi desde el día que la conocí, por escucharme y por darme sus sabios consejos, por estar en momentos felices y difíciles y sobre todo por darme su apoyo e insistir en que culminara esta mi carrera, le estaré agradecida siempre.

CONTENIDO DE ÍNDICE

AGRADECIMIENTO	I
DEDICATORIA	II
ÍNDICE DE CUADRO	VI
ÍNDICE DE FIGURA	1
RESUMEN.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
OBJETIVOS	5
GENERAL.....	5
Específicos	5
Hipótesis	5
REVISIÓN DE LITERATURA	6
Importancia del Agua.....	6
Problemática del agua en México.....	7
La legislación del agua en México.....	9
Normas relacionadas con el agua Residual.....	10
Definición de aguas Residuales.....	10
Contaminación del agua Residual	11
CONTAMINANTES FÍSICOS.....	11
CONTAMINANTES QUÍMICOS.....	12
CONTAMINANTES BIOLÓGICOS.....	14
Características de las aguas Residuales	14
Tratamiento de aguas residuales mediante lagunas de Estabilización	15

El Riego con aguas negras en México	15
Aspectos generales sobre el uso de aguas tratadas en Riego.....	18
Características del suelo de zonas irrigadas con aguas Residuales.....	19
La acelga como fito-extractora de metales Pasados.....	21
MATERIALES Y METODOS	23
Ubicación	23
Metodología Experimental	23
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
Análisis del agua de la planta tratadora de aguas Residual.....	27
Contenido de metales pesados en el Suelo.....	29
Contenido elemental en la raíz del cultivo de Acelga.....	31
Elementos en el tejido vegetal de Follaje	32
CONCLUSIONES.....	38
LITERATURA CITADA.....	39

ÍNDICE DE CUADRO

CUADRO 1 DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN EL MUNDO	6
CUADRO 2 USO DEL AGUA EN LA AGRICULTURA EN MÉXICO.....	8
CUADRO 3 NORMAS OFICIALES MEXICANAS.....	10
CUADRO 4 SITIO DE RECOLECCIÓN AGUA RESIDUAL DE LA PTAR.....	24
CUADRO 5. RESULTADOS DE ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DEL AGUA UTILIZADA DE LOS DIFERENTES PUNTOS DE LA PTAR.....	29
CUADRO 6. ALGUNAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y ELEMENTALES DEL SUELO EN ESTUDIO AL FINAL DEL EXPERIMENTO.....	31
CUADRO 7. CONTENIDO DE ALGUNOS ELEMENTOS EN RAÍZ DE ACELGA.....	32

ÍNDICE DE FIGURA

FIGURA 1 CROQUIS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL Y PUNTOS DE MUESTREO	25
FIGURA 2. CONCENTRACIÓN DE CA EN EL ÁREA FOLIAR DEL CULTIVO DE ACELGA.	33
FIGURA 3.PRESENCIA DE MG EN EL CULTIVO DE ACELGA.....	34
FIGURA 4. CONCENTRACIONES DE K EN EL ÁREA FOLIAR DEL CULTIVO DE ACELGA.	34
FIGURA 5. CONCENTRACIONES DE NA EN EL ÁREA FOLIAR DEL CULTIVO DE ACELGA	35
FIGURA 6 EFECTO DE TRATAMIENTOS SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE FE EN EL ÁREA FOLIAR DE ACELGA.	36
FIGURA 7 CONCENTRACIÓN DE PB EN EL ÁREA FOLIAR DEL CULTIVO DE ACELGA	36
FIGURA 8 PRESENCIA DEL ELEMENTO ZN EN EL ÁREA FOLIAR DEL CULTIVO DE ACELGA	37

RESUMEN

Con el objetivo de evaluar la extracción de algunos elementos minerales por acelga al regar con aguas residuales se realizó un experimento en la aérea de camas de cultivo del departamento de Ciencias del Suelo, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. En la PTAR se localizaron y ubicaron cinco puntos de muestreos (considerados como tratamiento) en las diferentes etapas de tratamiento de aguas residuales donde se obtuvo el agua tratadas, cada semana, durante cuatro meses. Se estableció un cultivo de acelga (*Beta vulgaris*) en macetas de 5 kg, con 6 tratamientos, y 4 repeticiones. Se evaluaron los elementos Ca, Mg K Na Fe Zn Cr Pb, en raíz y área foliar, además en suelo K, Na, Fe, Zn y Pb. Los resultados obtenidos muestran que en general la extracción de elementos por los diferentes tratamientos no presentó diferencias significativas. El agua obtenida de los diferentes puntos están de acuerdo a las normas oficiales, salvo la CE que sobre pasan los limites permisibles, por lo cual se debe de condicionar su uso.

Palabras claves: agua residual, metales pesados y acelga

Correo electrónico: rosyantonia4@gmail.com

INTRODUCCIÓN

El **agua** (del latín *aqua*) es una sustancia cuya molécula está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H₂O). Es esencial para la supervivencia de todas las formas conocidas de vida. El agua cubre el 71 por ciento de la superficie de la corteza terrestre. Se localiza principalmente en los océanos donde se concentra el 96,5 por ciento del agua total, los glaciares y casquetes polares poseen el 1.74 por ciento, los depósitos subterráneos (acuíferos), los permafrost y los glaciares continentales suponen el 1.72 por ciento y el restante 0.04 por ciento se reparte en orden decreciente entre lagos, humedad del suelo, atmósfera, embalses, ríos y seres vivos.

Se estima que aproximadamente el 70 por ciento del agua dulce es usada para agricultura. El agua en la industria favorece una media de 20 por ciento del consumo mundial, empleándose en tareas de refrigeración, transporte y como disolvente de una gran variedad de sustancias químicas. El consumo doméstico abastece el 10 por ciento restante.

El agua es esencial para la mayoría de las formas de vida conocidas por el hombre, incluida la humana. El acceso al agua potable se ha incrementado durante las últimas décadas en la superficie terrestre. Sin embargo estudios de la FAO, estiman que uno de cada cinco países en vías de desarrollo tendrá problemas de escasez de agua antes de 2030; en esos países es vital un menor gasto de agua en la agricultura modernizando los sistemas de riego y/o haciendo uso de las aguas residuales tratadas.

Para conocer las posibilidades de uso de las aguas residuales urbanas, su peligrosidad potencial, sus posibles aplicaciones en recuperación de los suelos, en reciclado de materias, en recuperación de productos, etc., es preciso conocer con

detalles las características de la composición y demás factores que conforman los efluentes. Como consecuencia se ha generado importantes volúmenes de aguas residuales representando un foco de infección y toxicidad a la salud humana y al medio ambiente (Jiménez, 2001).

La reutilización de aguas residuales urbanas es una práctica cada vez más extendida en países donde existen zonas áridas o semi-áridas, donde los recursos hídricos son escasos. Hoy en día, este tipo de aguas son consideradas como recursos hídricos alternativos, sobre todo en las zonas litorales donde las aguas depuradas no se reincorporan al ciclo hidrológico sino que se vierten al mar.

En la ciudad de Ciudad de Saltillo Coahuila, México se debe de utilizar el agua de las plantas tratadoras de aguas residuales para regar las áreas verdes, en lugar de verter al arroyo nuevamente, una de estas es la PTAR de la UAAAN la cual se utiliza para el riego de las áreas verdes de la universidad, y además, el uso se le debe de dar la prioridad en el riego de la huerta de los nogales, siempre y cuando cumpla con la caracterización establecida en la normatividad mexicana.

OBJETIVOS

GENERAL

Determinar la extracción de algunos elementos minerales por la acelga, regada con aguas residuales.

Específicos

Evaluar la extracción de algunos elementos minerales por acelga, dependiendo del punto de muestreo de agua

Medir el efecto del riego con agua residual de los diferentes puntos de tratamiento, en suelo

Hipótesis

La extracción de algunos elementos minerales por acelga regada con aguas residuales de la PTAR de la UAAAN varía según el punto de tratamiento.

REVISIÓN DE LITERATURA

Importancia del Agua

El agua es un elemento esencial para la vida en el planeta, debido a su limitada disponibilidad, este preciado líquido se ha convertido en un importante tema de preocupación internacional, ya que el caudal de agua dulce representa 2.87% del volumen existente (Cuadro 1).

Cuadro 1 Distribución del agua en el mundo

Océanos	97.13%
Casquetes polares y glaciares	2.24%
Aguas subterráneas	0.61%
Ríos, lagos	0.02%

Fuentes: Nalco Chemical Company, 1989.

La población esta en constante crecimiento, en consecuencia, el consumo de agua aumenta, debido a esto, la cantidad de agua existente para todos los usos esta comenzando a escasear acercándonos a una crisis mundial del agua. Por otro lado, la reducción del agua disponible debido a la contaminación, sumando a estos el efecto del cambio climático sobre los recursos hidráulicos es incierta ya que probablemente la precipitación aumente en algunas regiones, mientras en otras disminuyan. Se prevé que para mediados del presente siglo, al menos dos mil millones de personas en 48 países sufrirán escasez de agua Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2009).

En México, el crecimiento poblacional ha ejercido mayor presión sobre los recursos hídricos, al punto que el volumen de agua demandado por la sociedad, en

general, es mayor que el volumen suministrado en algunas regiones; entre los factores de mayor incidencia en la disponibilidad del agua a nivel nacional, esta el equilibrio en la disponibilidad natural, el crecimiento de población y su concentración en las principales ciudades del país Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2006).

Problemática del agua en México.

México enfrenta severos problemas en materias de disponibilidad de agua debido a una distribución irregular de este recurso en el territorio, esto nos pone en dos escenarios, uno en donde hay poca gente y mucha agua, y otro donde hay escasez del agua y una mayor concentración de la población, este problema se complica debido al crecimiento demográfico, al uso irracional y a la falta de una cultura del cuidado del agua. Si se analiza la disponibilidad de agua por regiones, en el norte, centro y noreste del país, regiones áridas y semiáridas, se genera el 85 % del PIB y vive 77 % de la población total y esta cuenta con 32 % del recurso hidráulico. En contraste en el sur y sureste del país, se localiza 68 % del agua, se asienta 23 % de la población total y se genera solo 15 % del PIB (CONAGUA, 2005). La superficie dedicada a la agricultura en México es aproximadamente de 21 millones de hectáreas (10.5 % del territorio nacional), de las cuales, 6.5 millones de hectáreas son de riego y 14.5 millones de hectáreas de temporal.

La productividad de áreas de riego, en promedio, 3.7 veces mayor que las de temporal, y a pesar de su menor superficie, la agricultura de riego genera mas de la mitad de la producción agrícola nacional. De las 6.5 millones de hectáreas de agricultura de riego, 3.5 (54%) corresponde a 85 distritos de riego y 3.0 (46%) a 39,492 unidades de riego. Por lo que se refiere a la superficie de temporal, 2.7 de las 14.5 millones de hectáreas, correspondientes a 22 distritos de temporal tecnificado.

El 88% del volumen de agua que se emplea en los distritos de riego proviene de fuentes superficiales que se almacenan en presas o se deriva de los ríos, y el 12% restante, corresponde a aguas subterráneas extraídas de los acuíferos a través de pozos profundos. En lo relativo a las unidades de riego, el 75% de agua que se

utiliza es subterránea y el 43% superficial. El Cuadro 2. Muestra en general que la agricultura de riego consume el 69% del agua de fuentes subterráneas (CONAGUA, 2007).

Cuadro 2 Uso del agua en la agricultura en México

Tipo de agricultura	Superficie. Millones de Hectáreas	Fuentes de agua	% de agua utilizada
Temporal	14.5	Agua de lluvia	100
Riego	6.5	Aguas subterráneas	69

Fuente: CONAGUA, 2007.

En lo que se refiere a los usos del agua, el volumen concesionado a diciembre de 2006, sin incluir la generación de energía hidroeléctrica, fue de 77, 321 millones de metros cúbicos, de ese volumen, el 77% corresponde a uso agrícola (incluyendo las actividades pecuarias, acuícolas y múltiples), 14% al uso público y 9% al uso industrial. Esta agua es obtenida de ríos y acuíferos (CONAGUA, 2007).

La eficiencia del uso del agua en el sector agrícola oscila entre 33% y 55%. Mientras que en las ciudades la eficiencia fluctúa entre el 50% y 70%. Las bajas eficiencias en el uso del agua, añadidas al incesante crecimiento poblacional y a la poca disponibilidad del agua, han ocasionado que el agua de los ríos y lagos sean insuficiente en algunas zonas, que las fuentes de abastecimiento subterráneas estén sobreexplotadas y que la calidad natural del agua se haya deteriorado. Lo anterior ha ocasionado una creciente competencia por el agua que se ha traducido en conflictos en diferentes zonas del territorio nacional y empieza a eliminar el bienestar social y desarrollo económico (CONAGUA, 2007).

La legislación del agua en México

La legislación se refiere a un conjunto de leyes de un estado sobre una materia o un sector, para el caso de México, en materia de agua, la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento establece los principios que sustentan la política hídrica nacional, algunos de estos principios a los que se hace referencia son:

a). el agua es un bien de dominio publico federal, vital vulnerable y finito, con valor social, económico y ambiental, cuya preservación en cantidad y calidad es tema fundamental del estado y la sociedad, así como prioridad y asunto de seguridad nacional, por lo tanto, la gestión integrada de los recursos hídricos es la base de la política hídrica nacional.

b). la conservación, preservación, protección y restauración del agua en cantidad y calidad es asunto de seguridad nacional, por lo tanto debe evitarse el aprovechamiento no sustentable y los efectos ecológicos adversos.

c). el aprovechamiento del agua debe realizarse con eficacia promoverse su reúso y recirculación. Por lo que la participación informada y responsable de la sociedad es base para la mejor gestión de los recursos hídricos y particularmente para su conservación, así que es esencial la educación ambiental, especialmente en materia del agua.

Así mismo, el Título IV, capítulo III, de la mencionada ley, establece las obligaciones que tendrán los asignatarios en materia de uso, explotación o aprovechamiento de agua destinada a los servicios con carácter público urbano o domestico, los cuales deben de garantizar la calidad del agua conforme a los parámetros referidos en las Normas Oficiales Mexicanas. Descargar aguas residuales a los cuerpos receptores previo tratamiento, cumpliendo con las Normas Oficiales Mexicanas, procurar su reúso y asumir los costos económicos y ambientales de la contaminación que provoca sus descargas, así como asumir las responsabilidades por el daño ambiental causado (CONAGUA, 2009).

Normas relacionadas con el agua Residual

Cuadro 3 Normas Oficiales Mexicanas

NOM-001 SEMARNAT- 1996. Publicada en el diario oficial de la federación el 6 de enero 1997.	Establece lo LMP* de contaminación en las descargas de agua residual en las aguas y bienes nacionales.
NOM-002-SEMARNAT-1996. Publicada en el diario oficial de la federación el 3 de junio de 1998.	Establece los LMP* de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
NOM-003-SEMARNAT-1997. Publicada en el diario oficial de la federación el 21 de septiembre de 1998.	Establece lo LMP* de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios públicos.

Fuente: CONAGUA, 2007.

*Limites Máximos Permisibles

Definición de aguas Residuales

Aguas residuales son las aguas de composición variada procedente de las descargas de uso público urbano, domestico, industrial, comercial, de servicio, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento, y en general de cualquier uso así como la mezcla de ellas (CONAGUA, 2009). Que por su composición no puede ser reutilizada sin un tratamiento y al ser sobre cuerpos receptores pueden tener efectos negativos.

Las aguas residuales pueden definirse como las aguas que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias. (Mara 1976).

Para algunos autores las aguas residuales son líquidos procedentes de la actividad humana y que generalmente son vertidos a cursos o masas de agua continental o marina. (Seoanez 1999).

Sin embargo Fair, *et al.*, (1966) y Juárez y Mijaylova (2004) dicen que el agua residual se origina por la introducción en ellas de organismos patógenos o sustancias tóxicas que la hacen inapropiada para consumo humano o uso domésticos. Metcalf y Eddy (1998) definen el agua residual como “la combinación de los residuos, procedentes de residencias, instituciones públicas y establecimientos industriales y comerciales, a los que, en algunas ocasiones se les pueden agregar aguas subterráneas, superficiales y pluviales”.

Martínez (2001) dice que son aguas degradadas debido al uso municipal o pecuario, mezcladas o no con aguas superficiales, subterráneas o de lluvias, y que contienen 0.10 por ciento de sólidos en suspensión o solución, lo que las convierte en peligrosas para uso humano.

Contaminación del agua Residual

Se ha demostrado que la introducción de contaminantes en el agua esta relacionada con la lluvia, las actividades de la naturaleza y de la población. Saldaña, *et al.*, (2011) mencionan que la degradación de los recursos acuáticos se ha incrementado debido a las descargas antropogénicas y que los diversos agentes contaminantes que deterioran la calidad del agua no son producidos bajo condiciones naturales.

Por su parte, el Instituto Mexicano De Tecnología Del Agua IMTA (1994) distingue los contaminantes del agua residual y los clasifica en contaminantes físicos, químicos y biológicos.

CONTAMINANTES FÍSICOS.

Sólidos suspendidos (SS): La materia en suspensión esta compuesta por diversos tipos de sólidos flotantes, sedimentables y coloidales. Además por su composición pueden ser orgánicos e inorgánicos. Un solido en suspensión es aquel que puede retenerse en un filtro estándar de fibra de vidrio cuyo diámetro sea de 1.2μ los sólidos que pasan a través de dichos filtro representan la fracción compuesta por los sólidos coloidales y los sólidos disueltos. El origen de los sólidos

es muy amplio dado que casi todos los usos del agua (uso domestico, agrícola, pecuario, industrial) aportan sólidos suspendidos al agua residual. Los efectos de los SS en los cuerpos de agua están asociados al tamaño y la naturaleza del solido, entre los efectos mas notables esta la interferencia en la penetración de la luz solar (turbiedad) y el azolve de los cuerpos de agua (Arce, *et al.*, 2010).

CONTAMINANTES QUÍMICOS

Materia orgánica: puesto que el material orgánico constituye una parte significativa del suelo, y ya que es utilizado por los organismos acuáticos para construir sus cuerpos y producir alimentos, es inevitable encontrar productos orgánicos solubles provenientes del metabolismo de estos organismos en todas las fuentes de agua (Nalco Chemical Company, 1989). La materia orgánica, es susceptible de ser oxidada y transformada en compuesto más simple como bióxido de carbono y agua por acción de las bacterias. Si hay oxígeno disuelto en el agua las bacterias aerobias lo consumen para llevar a cabo dicha transformación.

Nitrógeno amoniacal: el nitrógeno amoniacal también puede ser oxidado por las bacterias aerobias y se transforma en nitritos y nitratos.

Debido a la dificultad de hacer un análisis estequiométrico de la materia orgánica presente en el agua residual, se han desarrollado métodos analíticos indirectos que miden la cantidad de oxígeno requerida para la transformación y de esta forma se conoce la cantidad de materia orgánica presente, los métodos de mayor uso son la DBO₅ y la DQO. La DBO₅ es una cantidad aproximada de oxígeno que requiere una población microbiana para la oxidación de la materia orgánica y la DQO es una oxidación en medio ácido en presencia de un oxidante fuerte (Dicromato de potasio) y con aplicación de calor, bajo estas condiciones se oxida toda la materia orgánica presente, incluso aquella que los microorganismos no son capaces de degradar, por ello la DQO es mayor que la DBO₅. (Arce, *et al.*, 2010). Ciertos minerales orgánicos presentes en el agua contaminada por las descargas industriales en concentraciones muy inferiores a 1mg l⁻¹ pueden ejercer un efecto muy significativo sobre la vida de la corriente receptora (Nalco Chemical Company, 1989).

Metales pesados: Ramírez (1999) menciona que los metales son materiales naturales que desde la edad de hierro han sido parte fundamental para el desarrollo de las civilizaciones. Estos pueden encontrarse en mayor concentración en los extractos profundos de los ríos y en menor proporción en la superficie.

Los metales pesados son aquellos cuya densidad es por lo menos cinco veces mayor que la del agua, entre los más conocidos se encuentran el Arsénico, Cadmio, Cobalto, Cromo, Cobre, Mercurio, Níquel, Plomo y Zinc. La presencia de estos metales en el organismo del ser humano se da a través de la cadena trófica. La peligrosidad de los metales pesados se debe a que estos no pueden ser biodegradados ni degradados químicamente, una vez emitidos pueden permanecer en el ambiente durante años. Además, su concentración en los seres vivos aumenta a medida que son ingeridos, por lo que el consumo de animales o plantas contaminadas pueden causar síntomas de intoxicación.

Entre los metales, se encuentran algunos que son requeridos en mínimas cantidades por los organismos ya que los utilizan en sus funciones metabólicas, como el hierro que forma parte de la hemoglobina, su ausencia causa anemia, pasando cierto umbral se vuelve tóxico.

El contenido de metales pesados en el agua es únicamente una función de la calidad del agua y de la procedencia de esta, por lo tanto, para el reconocimiento de la contaminación por metales se utilizan términos de referencias establecidos como Normas. En el suelo, pueden quedar retenidos, ya sea disueltos en la solución del suelo o fijados por procesos de adsorción, formando complejos y por precipitación. Pueden ser absorbidos por las plantas y animales incorporándose a las cadenas tróficas; y movilizarse en aguas superficiales y subterráneas.

En general, lo que hace tóxicos a los metales pesados, no es su característica esencial, sino su concentración y la forma química en la que pueden encontrarse; por otra parte, entre los factores que afectan la acumulación y disponibilidad de los metales pesados está el pH, este es un factor esencial debido a que la mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, si el pH es alcalino puede

bajar la toxicidad del metal por precipitación como carbonatos e hidróxidos. La adsorción de los metales pesados esta condicionada por el pH del suelo.

CONTAMINANTES BIOLÓGICOS

Los microorganismos de interés en la contaminación del agua son los virus, las bacterias, protozoarios y huevos de helminto. Los indicadores de contaminación por heces fecales son los coliformes fecales, si bien estos microorganismos no causan mayores daños a la salud su presencia indica el ingreso de materia fecal en el agua y alertas sobre la presencia potencial de otros organismos como salmonella y shigella. Las descargas domesticas sin tratamientos en cuerpos receptores son la causa principal de contaminación por patógenos en las aguas superficiales y subterráneas. Estos agentes microbiológicos representan un problema de salud publica, por lo que para controlar la incidencia de enfermedades gastrointestinales se debe reducir su presencia en le agua para riego de vegetales que se consumen crudos (Arce, *et al.* 2010).

Características de las aguas Residuales

Existe una diversidad de aguas residuales por su naturaleza así como sus niveles de contenidos, de acuerdo a los sitios por donde fluyen, según Reynolds (2002), las aguas residuales consisten de dos componentes: un efluente líquido y un constituyente sólido, conocido como lodo. Es importante tener referencia sobre la calidad del agua residual en particular, así como la cantidad de parámetros de sus constituyentes físicos, químicos y biológicos; que sirven como criterio para determinar los procedimientos y equipos depuradores más adecuados según el tratamiento a aplicar.

De acuerdo a Metcalf y Eddy (1998) los que mas importan son: la temperatura, sólidos, materia flotante, color y olor; pH, grasas y aceites, demanda bioquímica de oxigeno, demanda química de oxigeno y metales pesados; coliformes totales y fecales.

Tratamiento de aguas residuales mediante lagunas de Estabilización

El tratamiento de aguas residuales mediante lagunas de estabilización es recomendable para tratar aguas preferentemente de comunidades pequeñas hasta ciudades de 200,000 habitantes. En este sistema de tratamiento con relación a otros sistemas convencionales, no es necesario adicionar cloro al efluente para su desinfección puesto que las lagunas de estabilización son diseñadas para tratar agua por medio de la interacción de la biomasa (algas, bacterias), la materia orgánica del desecho y otros procesos naturales. En las lagunas de oxidación se implica la oxidación de la materia orgánica con el oxígeno producido por las algas a través de la fotosíntesis, las bacterias aeróbicas usan este oxígeno para transformar los desechos orgánicos existentes en el agua residual. Como resultado del proceso fotosintético, existe una variación en la concentración de oxígeno disuelto, lo que influye en la actividad de las algas, donde los iones carbonato y bicarbonato reaccionan para proveer más dióxido de carbono a las algas produciendo una variación en la alcalinidad. Además la actividad de las algas se ve afectada por los cambios en la intensidad de luz originando grandes fluctuaciones en la calidad del efluente y dando un color verde oscuro al agua. La finalidad del tratamiento es obtener un efluente con características definidas de acuerdo a su reúso o para descarga en cuerpos receptores (IMTA, 1994).

Debido a la actividad biológica en las lagunas de estabilidad existe una variación en parámetros como oxígeno disuelto, sólidos suspendidos, turbidez, entre otros (Nalco Chemical Company, 1989).

El Riego con aguas negras en México

La aplicación de aguas residuales (AR) a terrenos agrícolas para riego, aprovechando su valor fertilizante, o para su eliminación evitando la contaminación de ríos, es una práctica realizada desde la antigüedad por griegos y romanos y habitualmente china, Inglaterra o Alemania desde el siglo XVI. La aplicación en riego de las aguas residuales es un sistema alternativo de depuración, como mecanismo eficaz para regular los recursos hídricos en zonas muy deficitarias.

La agricultura en zonas áridas y semiáridas depende casi absolutamente del riego, y de la demanda de agua de riego representa un porcentaje que supera el 60% de la demanda total de agua. La elevada demanda de agua para riego, convierte el aprovechamiento de las AR en una fuente inestimable de este recurso (Pérez y Vallverdu, 2000). En lo que respecta a la calidad del agua, se ha encontrado que prácticamente todos los cuerpos de agua importantes están contaminados a diferentes niveles. Se considera que por su nivel de contaminación se requiere atención prioritaria en las siguientes cuencas: Pánuco, Lerma, Balsas, San Juan, Coatzacoalcos, Blanco, Papaloapan, Valle de México, Conchos, Coahuayana, Culiacán, Fuerte, Yaqui, Mayo y Bajo Bravo; varios de estos se aprovechan para riego agrícola. Esta situación se debe principalmente a la contaminación que reciben de alguna ciudad o de la industria.

En México, se llegan a generar 200 m³/s de aguas residuales y se recolectan en los alcantarillados 135 m³/s, y se cuenta con infraestructura para tratar 43 m³/s, sin embargo se tratan de modo adecuado 17 m³/s, mientras que se descargan al medio ambiente sin tratar 183 m³/s Comisión Nacional del Agua (CNA, 1995)

Asimismo, en 1994 el volumen estimado de descargas generado por la industria fue aproximadamente de 1.8 km³, lo que equivale a 57 m³/s con una carga orgánica de 1.4 millones de toneladas al año equivalente a la contaminación que genera 68 millones de habitantes. El caudal que se trata de aguas residuales es de 5.3 m³/s lo que representa solo el 9% de lo generado y el caudal sin tratar es de 51.2 m³/s. En la industria, los giros que más utilizan y con mayor potencial de contaminación son: Azúcar, Química, Petroquímica, Petrolera, Celulosa y Papel, Alimenticia y Metálica Básica; en estas, los contaminantes que destacan son los ácidos, las bases, las grasas, los aceites y los metales pesados (CNA, 1995).

Y es que las industrias se han establecido en el país sin un estudio previo de disponibilidad del líquido provocando fuertes demandas de agua en zonas de baja disponibilidad lo que contribuye a que este sector compita fuertemente con otros por ella, además de ocasionar sobreexplotación de acuíferos, contaminación de los ecosistemas y altos costos del recurso hídrico.

Siendo preocupantes las estimaciones que se hacen sobre este recurso (CNA, 1995), porque se calcula que la demanda de agua al año 2000 será de 2.3 m³/s, equivalente a 73 m³/s, y la descarga de aguas residuales será de 1.89 km³/año, equivalente a 60 m³/s, observándose que solo el 9% de las aguas se llegan a tratar. En relación con las aguas residuales de las ciudades usadas para riego agrícola, México ocupa el segundo lugar a nivel mundial, con un área de 340,000 hectáreas.

Esta fuente de agua residual para el riego será cada vez más importante (pero cada vez más preocupante por los problemas de salud y falta de calidad en los productos obtenidos, en el caso de la agricultura) debido a la fuerte competencia de uso doméstico-urbano e industrial por las aguas blancas para el riego agrícola, pero también se espera que a la par existan avances importantes en las tecnologías para su tratamiento que requieren de una mayor aplicación en el país.

Áreas Regadas con Aguas Residuales

El estado que tiene mayor cantidad de hectáreas regadas con aguas residuales es Hidalgo, provenientes principalmente de la ciudad de México, con 90,000 hectáreas. Nuevamente encontramos una situación preocupante, y es que después de Hidalgo (26.2% del total nacional), es el estado de Michoacán el que sigue en orden de importancia con 52,205 hectáreas (15.2%), es decir este estado ocupa el segundo lugar a nivel nacional en utilizar aguas contaminadas para riego. Otros estados también representativos son Morelos con 42,797 (12.43%), Veracruz con 40,768 (11.8%) y Sonora con 25,523 hectáreas (7.4%). Estos 5 estados contabilizan el 73.3% del total de áreas regadas con aguas residuales (FIRA, 1998).

Un Caso Relevante: El Valle del Mezquital en México

Este sería otro caso en el uso de aguas residuales en la agricultura, pero cabría situarlo también a nivel mundial pues esta región irrigada destaca por sus dimensiones, ubicándose en segundo lugar en el mundo después de China (con una superficie irrigada con aguas residuales de 1, 330,000 hectáreas); México tiene 340,000 hectáreas y de esas el caso del Mezquital en Hidalgo registra el 26.2% con

90,000 hectáreas regadas Fideicomisos Instituidos con Relación a la Agricultura (FIRA, 1998).

Esta región es el área continua más grande del mundo irrigado con aguas negras, y es también una región que a lo largo de un siglo ha mostrado efectos positivos al utilizar este recurso en la producción agrícola, favoreciendo el crecimiento económico de la zona.

La problemática del Valle del Mezquital es uno de los casos en donde se hace uso de aguas negras de origen urbano en la agricultura pero en esta región se presenta una situación paradójica, como Peña de Paz (1997) precisa, y es que existe oposición campesina a la medida propuesta por el gobierno el cual prohibió el riego de hortalizas con aguas residuales por el riesgo sanitario que esta práctica encierra, medida que parece legítima y fundada en el interés social. Existe así un vínculo de agua entre la ciudad de México y el área rural circundante del Valle del Mezquital teniendo las siguientes características: 1) el agua que se transfiere es agua completamente de desecho, sucia; 2) las aguas salen de la ciudad, y transfiere el líquido hacia la zona rural que lo utiliza en la agricultura para riego; 3) además, no existe conflicto alguno entre las dos partes de la transferencia por la cantidad de agua desplazada. Al contrario de lo que pudiera pensarse, existe una fuerte relación porque toda el agua de la que se quiere deshacer la ciudad es bien recibida por los agricultores del Mezquital, donde escasea.

Aspectos generales sobre el uso de aguas tratadas en Riego

El reúso de aguas tratadas en distintas aplicaciones ha sido practicado por más de un siglo en distintas partes del mundo, incluso antes de que las tecnologías de tratamiento estuvieran suficientemente desarrolladas. En este caso, la aplicación de estos efluentes al terreno pasó a constituir una alternativa costo-efectiva frente a la descarga de las aguas tratadas a aguas superficiales. Entre las mayores aplicaciones se encuentran actualmente los usos no potables como riego agrícola, riego para parques, zonas forestales y campos de golf.

Cuando se considera el riego con aguas servidas tratadas, existen factores relevantes necesarios de tener en cuenta. Estos se indican a continuación World Health Organization (WHO, 1996):

Riego con o sin Restricciones.

El “Riego con Restricciones” se refiere al uso de efluentes de baja calidad en áreas específicas, donde sólo ciertas especies pueden ser cultivadas. Las restricciones impuestas usualmente consideran tipo de cultivo, métodos de riego, métodos de cosecha, tasa de aplicación de fertilizantes, distancia entre los predios regados y áreas residenciales, así como también las distancias a fuentes de agua.

El “Riego sin Restricciones” se refiere al uso de efluentes tratados de alta calidad para el riego de cualquier tipo de cultivo en cualquier tipo de suelo, sin presentar ningún riesgo ambiental a los suelos, cultivos, animales, personas involucradas en los procesos productivos ni tampoco sobre los consumidores de los productos agrícolas.

La calidad del efluente es el factor más importante para definir el tipo de reúso (riego con o sin restricciones), tipo de cultivos y métodos de riego. La calidad del efluente debe ser calificada considerando tanto aspectos sanitarios como agronómicos. La mayoría de límites establecidos para reúso de aguas tratadas se refieren básicamente a aspectos de salud pública y definen procesos de tratamiento o parámetros de calidad que los efluentes deben cumplir antes del reúso.

Características del suelo de zonas irrigadas con aguas Residuales

Los metales pesados están presentes en el suelo como componentes naturales del mismo o como consecuencia de actividades antropogénicas; sin embargo, en lugares donde se han venido utilizando aguas residuales para el riego agrícola, se reporta una tendencia creciente en las concentraciones de metales en los suelos, por efecto del tiempo (años) de uso de esta agua, por ejemplo, el níquel y

el plomo han mostrado una mayor tasa anual de acumulación (Vázquez-Alarcón et al., 2001; Prieto, *et al.*, 2009).

El riego de cultivos agrícolas con aguas residual aporta al suelo una cantidad considerable de compuestos. En primer lugar, contribuye a aumentar el contenido de fosforo disponible en la capa arable de los suelos de los niveles bajos a medios (de 2 a 9 g de P. m²) que se encuentra aún en los suelos de temporal de la región, a intervalos medios a altos (14 a 25 g de P. m²) en 80 años de riego (Siebe, 1998). Algo similar ocurre con el nitrógeno total, pero de manera menos pronunciada, ya que de un valor de 0.2 kg de N. m² que se encuentra en suelos de temporal, los suelos bajo riego con agua residuales ahora contienen 0.8 kg de N. m². La razón por el cual ha aumentado el nitrógeno en comparación con el fosforo se debe a que el segundo es muy poco móvil y tiende a acumularse en el suelo, mientras que el nitrógeno es mucho más soluble, por lo que una parte se lixivia, es decir, es arrastrado por el agua a estratos más profundos o incluso se volatiliza a la atmosfera (Jiménez. *et al.*, 2005).

Al igual que el fosforo y el nitrógeno, el suelo recibe materia orgánica proveniente del aguas residual. En los suelos regados por más de 65 años con estas aguas, el contenido promedio de materia orgánica ha aumentado de 2.0 % a 4.6 %, lo que también beneficia la productividad del suelo (Jiménez *et al.*, 2005).

Otro efecto negativo en los suelos, es el aumento de ion sodio en los sitios de intercambio iónico en los suelos, y con ello la disminución de la acumulación del ion calcio. El ion sodio puede causar efectos tóxicos para las plantas y desplaza a otros iones, como el calcio, que son necesarios para la nutrición. Este problema es más grave en los suelos que presentan problemas de drenaje interno (como los vertisoles) y el nivel freático se encuentra a menos de dos metros de profundidad; estas características se encuentran en las partes más bajas del valle del Mezquital (San Salvador, Tlahuelilpan, Bojayito chino, san José Bojay) (Hernández, 1988).

En cuando al aporte de metales al suelo del valle del Mezquital, a pesar de que las concentraciones en el agua residual proveniente de la ciudad de México, son bajas y no rebasan los límites establecidos en la normatividad mexicana, el riego adiciona anualmente pequeñas cantidades, entre 0.15 a 0.28 g.m⁻² de Pb, <0.009 a 0.011g.m⁻² de Cd, 0.19 a 0.40 g.m⁻² de Cu y 0.49 a 1.13 g.m⁻² de Zn (Siebe, 1994; Gutiérrez-Ruiz. *et al.*, 1995).

Por otra parte, el riego con aguas residuales no solo modifica el contenido de metales en el suelo, sino que también cambia la actividad microbiana en cantidad y en calidad (Friedel. *et al.*, 2000; Ortega-Larrocea *et al.*, 2000). Al inicio, el aporte de nutrimentos y materia orgánica favorecen el crecimiento de microorganismos pero con el tiempo (más de 65 años) se observa que la actividad microbiana disminuye por los efectos tóxicos del sodio (Jiménez *et al.*, 2005).

La acelga como fito-extractora de metales Pasados

Los conocimientos que se tienen de las plantas que pueden extraer metales pesados pueden ayudar en los esfuerzos de fitorremediación, empleando algunas especies de plantas especializadas que acumulan metales pesados y han sido propuestas como una alternativa para retirarlo de suelos contaminados. Por ejemplo Beta vulgaris L, especie que ha sido utilizada para reducir concentraciones de metales pesados (Zn, Cd, Ni y Cu) en suelos bajo condiciones de invernadero (Haq *et al.*, 1980).

Angelova. *et al.*, (2005) mencionan que la contaminación de metales pesados en el suelo y agua puede convertirse en un problema grave para la agricultura y la salud. Se han propuesto tecnologías alternativas para la remediación del suelo como las especies de la planta acumuladora de metales pesados en tallos.

La acumulación de Cd, Pb y Zn por diversas plantas cultivadas en suelos contaminados con metales pesados, se dividieron en cuatro grupos de acuerdo a su

capacidad de acumular los metales pesados; acumulación bajo maíz y guisantes, acumulador moderado (cebada, lentejas, girasol, sésamo, hinojo, coriandro, eneldo hierbabuena, albahaca, algodón, patatas, datura), alto acumulador (trigo, soja, habas, cacahuetes, anís, mostaza negra, lino, cáñamo, remolacha, remolacha forrajera) y hiperacumuladoras (salvia y tabaco).

Cada una de estas plantas en estos grupos puede crecer con éxito en suelos levemente contaminados.

Iannacone y Alvariño (2005), evaluaron el efecto foto tóxico del Cr^+ , Hg^+ y Pb^+ en forma de dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), cloruro de mercurio (Cl_2Hg) y acetato de plomo ($(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Pb}$) respectivamente, sobre el crecimiento radicular de cuatro especies de las plantas superiores terrestres: cebollas (*Allium cepa*), Acelga (*Beta vulgaris*), Arroz (*Oriza sativa*) y rabanitos (*Raphanuz sativus*) a 192 h (8 días) de exposición. Se realizaron bioensayos de toxicidad para cada metal y para cada especie de planta.

De acuerdo con lo anterior, se puede hacer la inferencia de que el riego de cultivos agrícolas con agua residual tiene un efecto sobre la fertilidad del suelo, así como en la acumulación de metales potencialmente tóxico para el humano; así también, la inocuidad de los productos (Rosas *et al.*, 1984).

MATERIALES Y METODOS

Ubicación

El presente trabajo se realizó en el Departamento de Ciencias del Suelo del Campus de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Buenavista Saltillo, Coahuila, México. Ubicada a los 25°21'14" Latitud Norte y 101°2'2" Longitud Oeste.

Metodología Experimental

La investigación se realizó con el agua residual tratada en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la Universidad. La PTAR colinda al norte con el jardín botánico "Ing. Gustavo Aguirre Benavides", al sur con el jardín hidráulico, al este con el Departamento de Fitomejoramiento y al oeste con el Departamento de Horticultura.

En la PTAR se localizaron y ubicaron cinco puntos de muestreos (considerados como tratamiento) en las diferentes etapas de tratamiento de aguas residuales donde se realizó la obtención de las aguas tratadas, en recipientes de plástico de una capacidad de cinco litros, cada semana, durante cuatro meses (Figura 1).

Las aguas obtenidas en el primer muestreo se llevaron al laboratorio de química de suelos del Departamento Ciencias del Suelo donde fueron analizadas para, pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos totales (ST) y demanda química de oxígeno (DQO). Además se analizaron algunos metales pesados como cobre, cromo, plomo y zinc.

Al mismo tiempo se prepararon macetas con una capacidad de cinco kilos, las cuales se llenaron con un calcisol contaminado con plomo a 1000 mg kg⁻¹. Posteriormente se sembraron 3 semillas de acelgas en cada maceta y se regaron periódicamente con las aguas residuales tratadas.

Una vez que las plantas emergieron y aproximadamente seis semanas después de la siembra, se realizó un primer corte cosechando parte de las hojas, las cuales se llevaron al laboratorio, se metieron a la estufa a 70⁰ C para su secado y posteriormente se pesaron y digirieron con HNO₃ para después ser analizadas por algunos elementos esenciales y metales pesados. El mismo tratamiento se le dio a la raíz después del segundo Corte una vez terminado el experimento.

Al término de la investigación también se recuperó el suelo de los diferentes tratamientos, mezclando las repeticiones y homogenizando muy bien estas para obtener una muestra representativa de cada tratamiento, se llevaron al laboratorio se secaron, se tamizaron a dos milímetros y analizaron MO, pH, CE, K, Na, Fe, Zn y P. Los elementos se obtuvieron por vía húmeda con HNO₃ y se analizaron y cuantificaron por absorción atómica en un equipo Spectr AA 5. (Jackson 1976).

Los resultados se exponen y discuten en función de cada variable. La información que se presenta corresponde a los análisis de laboratorio que se realizaron a los diferentes tratamientos con sus respectivas repeticiones. Para pH, M.O y C.E. y además a algunos elementos se les realizó el análisis de varianza (ANVA) correspondiente y la comparación de medias. Esto solamente a los elementos extraídos por la materia seca producida.

Cuadro 4 Tratamientos y sitios de muestro del agua residual de la PTAR

Sitio	Tratamiento	Clave
Agua de Pozo	Testigo	T
1	Tanque Imhoff	TI
2	Tanque de Amortiguamiento	TA
3	Tanque de Filtración	TF
4	Laguna de oxidación	LO
5	Laguna de oxidación final	LOF

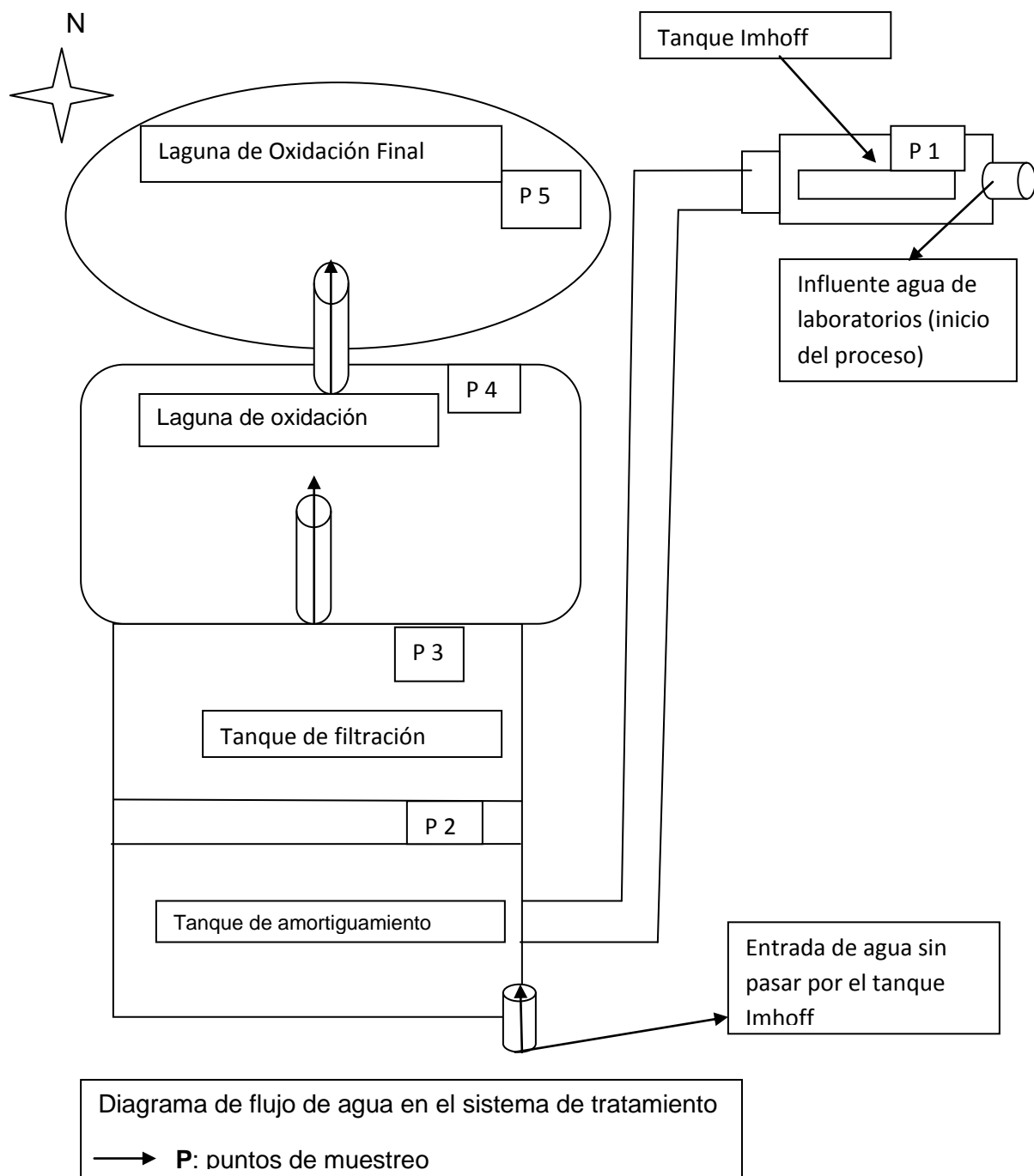


Figura 1 Croquis de la planta de tratamiento de agua residual y puntos de muestreo

Las variables evaluadas fueron algunos metales pesados considerando como tales los elementos, Cromo (Cr), Zinc (Zn), Plomo (Pb) y Cobre (Cu) analizados en agua además, tomando en cuenta algunas propiedades químicas como pH, CE, Sólidos totales (ST) y Demanda Química de Oxígeno (DQO). En suelo, contenido de materia orgánica (M.O.), pH y CE y elementos tales como Hierro (Fe), Potasio (K), Sodio (Na), Zinc (Zn) y Plomo (Pb). En planta se analizaron los elementos Magnesio (Mg), Calcio (Ca) potasio (K) sodio (Na) fierro (Fe) zinc (Zn) y plomo (Pb). Todos ellos se analizaron en su forma total.

El diseño experimental usado para el análisis de los resultados de los metales pesados en su forma total fue un diseño completamente al azar con seis tratamientos (un testigo T que fue agua de pozo y cinco de agua residuales de acuerdo a los puntos de muestreo en orden creciente, TI_{S1} , TA_{S2} , TF_{S3} , LO_{S4} y LOF_{S5} (Cuadro 4) y cuatro repeticiones por tratamientos que sumaron 24 unidades experimentales, utilizando para esto el paquete de diseños experimentales del programa del SAS, versión 9.1 para el análisis de la comparación del rango de las medias, fue utilizado el mismo paquete, con el método de Duncan's multiple-range test.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis del agua de la planta tratadora de aguas Residual

En el cuadro 5, se presentan los resultados de estas características, en el se observa que el pH del agua se encuentra entre valores de 6.8–7.4. A diferencia del testigo, en el tratamiento del TA_{S2} y TF_{S3} muestran un pH ligeramente ácido, este comportamiento es debido a las actividades en los laboratorios de la universidad, que generan las descargas de agua cruda las cuales son ligeramente ácidas. Sin embargo, en el tratamiento del TI_{S1} , LO_{S4} y LOF_{S5} el pH es ligeramente alcalino. Al respecto el IMTA (1994) menciona que como resultado del proceso fotosintético en las lagunas de oxidación, existe una variación en la concentración de oxígeno disuelto, lo que influye en la actividades de las algas, donde los iones carbonato y bicarbonato reaccionan para proveer más dióxido de carbono a las algas produciendo una variación en el pH.

La conductividad eléctrica (C.E) oscila entre 2,200 y 2,400 $\mu S\ cm^{-1}$. El valor más bajo se presenta en el tratamiento del TI_{S1} . Tiende a incrementarse en el tratamiento del TA_{S2} y TF_{S3} respectivamente, lo que indica que hay presencia de descargas como compuestos iónicos. La C.E disminuye en el tratamiento del LO_{S4} y LOF_{S5} .

Los resultados encontrados muestran un índice de salinidad altos ya que el agua se considera altamente salina cuando presenta una C.E mayor a 2,250 $\mu S\ cm^{-1}$ (Alcantar, et al, 1992) estos resultados coinciden con los que encuentran Rodríguez, et al, (2009) para efluentes de plantas de tratamiento.

Los sólidos totales (ST) incluyen a los sólidos sedimentables y sólidos en suspensión, en este estudio, se aprecia el comportamiento de los ST observándose

una disminución en el tratamiento del TF_{S3} y LO_{S4} , el valor incrementa en el tratamiento del TA_{S2} por la entrada de agua cruda en este punto específicamente.

La demanda bioquímica de oxígeno (DQO) es un termino de referencia que se utiliza para expresar la cantidad de materia oxidable presente en el agua, cualquiera que sea su origen orgánico o mineral. Bajo las condiciones en que se determina la DQO se oxida toda la materia orgánica presente, incluso aquella que los microorganismo no son capaces de degradar (Arce, *et al.* 2010). En este estudio la DQO disminuye de la LO_{S4} lo cual indica la remoción de materia orgánica e inorgánica. Los valores de DQO se incrementan en el TA_{S2} por el flujo de agua cruda, disminuyen nuevamente en los sitios TI_{S1} , TF_{S3} y LOF_{S5} por la remoción de la materia orgánica e inorgánica en estas etapas de tratamiento

Elementos como cromo, plomo y zinc, son los de mayor presencia en las aguas residuales, el cromo se presenta por las actividades de laboratorios de la universidad que utilizan reactivos como Dicromato de potasio en la determinación de materia orgánica y demanda química de oxígeno; con respecto a metales pesados, Ramírez (1999) en su investigación menciona que el pH es un factor determinante para la disponibilidad de metales, por lo que se asume en este estudio que los metales presentes (Cromo, Plomo y Zinc) en el efluente (LOF_{S5}), son precipitados debido a la alcalinidad que presenta el agua.

Siebe (1994) menciona en su trabajo que la importancia y estudio de estos metales se debe a que son bioacumulables y no pueden ser biodegradados a la vez que pueden ser retenidos y acumulados en la capa arable del suelo que es regado con agua residual, en su estudio encontró que los metales adicionados al suelo a través del riego con este tipo de aguas, se acumularon en el horizonte Ap de todos los suelos analizados, en los primeros 30 cm de profundidad.

Cuadro 5. Resultados de algunas características del agua utilizada

Tratamiento	pH	C.E $\mu\text{S cm}^{-1}$	ST mgL^{-1}	DQO mg L^{-1}	Cobre	Cromo	Plomo	Zinc
T	7.6	0.8	0.48	ND	0.02	ND	ND	ND
TI _{S1}	7.2	2280	1067	29.67	ND	0.04	0.1	0.1
TA _{S2}	6.8	2332	1428	78.65	ND	0.05	0.1	0.1
TF _{S3}	6.8	2398	962	27.93	ND	0.03	0.1	0.1
LO _{S4}	7.1	2395	865	26.26	ND	0.04	0.4	0.1
LOF _{S5}	7.4	2340	1137	33.76	ND	0.06	0.1	0.1

Contenido de metales pesados en el Suelo

En el cuadro 6 se pueden observar algunas características químicas y elementales del suelo y a continuación se comentan, los valores de M.O. presentan ligeras diferencia entre tratamientos, los más altos se concentran en los tratamientos del TF_{S3} y LOF_{S5} con los valores 4.46 y 4.40 % respectivamente y el valor mas bajo es en el sitio TF_{S3} con un porcentaje de 4.17%.

La relación entre la materia orgánica y los metales es importante en la disponibilidad de estos debido a su alta capacidad de formar complejos (Reichman, 2002). En general, las plantas no absorben complejos metálicos grandes por lo que su biodisponibilidad disminuye, sin embargo, también existen compuestos orgánicos solubles pesados (Alloway, 1995).

El pH del suelo es considerado como una de las principales variables en los suelos, ya que controla muchos procesos químicos que en este tienen lugar. Afecta específicamente la disponibilidad de los nutrientes para las plantas mediante el control de las formas químicas de los nutrientes. El rango de pH óptimo para la mayoría de las plantas oscila entre 5,5 y 7,0, sin embargo muchas plantas se han adaptado para crecer a valores de pH fuera de este rango.

Es importante mencionar que el proceso de los tratamientos del agua residual en el cultivo de acelga, tiene un parámetro de pH neutral, tendiéndose ligeramente a un valor básico (Cuadro 6).

Los valores de C.E. presentan ligeras diferencias entre tratamientos, los más altos se concentran en los sitios LO_{S4} y LOF_{S5} con los valores 0.7 y 0.67 $\mu\text{s cm}^{-1}$ respectivamente y los valores mas bajos en los sitios TI_{S1} y TF_{S3} con su respectiva concentración en $\mu\text{s cm}^{-1}$ 0.55 y 0.56.

Durante las etapas de riego con los diferentes tratamientos del agua residual la salinidad se va concentrando de manera diferente en el suelo. Las concentraciones de sales se deben principalmente por los elementos calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K) y magnesio (Mg) según lo fundamenta Porta. *et al.*, 2003.

El K presenta diferencia entre tratamientos hasta de 700 mg kg⁻¹ concentrándose más en los sitios TF_{S3} y LOF_{S5}, y los menores concentraciones detectables de K se presenta sobre los tratamientos TI_{S1}, TA_{S2}, T y LO_{S4}. El Sodio presento diferencia entre los tratamientos, como se puede observar en el Cuadro 6. En el sitio T y LOF_{S5} se encuentran los valores más altos de Na. Por el contrario los sitios TI_{S1} y TF_{S3} tienen los valores bajos. El Fierro prácticamente no muestra diferencia, ya que en el tratamiento 2 el valor es 2100 mg kg⁻¹ y el resto de los sitios (T, TA_{S2}, TF_{S3}, LO_{S4} y LOF_{S5}) el valor es 2000 mg kg⁻¹. Para el Zinc no se observan diferencias ya que los tratamientos se encuentran con el mismo valor. Los resultados muestran que no existe riesgo alguno para las plantas, ya que los niveles no sobrepasan los valores máximos permisibles para las plantas según citado por Mortvedt. *et al.* (1983).

El elemento Plomo presenta también ligeras diferencias entre tratamientos, es conveniente señalar que el suelo utilizado para este estudio se contamina con plomo previamente para otros trabajos con un promedio de 1000 mg kg⁻¹, donde se

presenta en mayor cantidad, es en el tratamiento del TF_{S3}, T y LO_{S4} con un valor concentrado de 910, 890 y 870 mg kg⁻¹, así mismo el tratamiento del TA_{S2} tuvo menos presencia de plomo, que en los de mas tratamiento.

Cuadro 6. Algunas características químicas y elementales del suelo en estudio al final del experimento

Tratamiento	M.O%	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	(mg kg ⁻¹)				
				K	Na	Fe	Zn	Pb
T	4.34	7.36	0.6	1500	11800	2000	70	890
TI _{S1}	4.29	7.65	0.55	1300	8300	2100	70	820
TA _{S2}	4.17	7.89	0.6	1400	9000	2000	70	770
TF _{S3}	4.46	7.23	0.56	1600	6500	2000	70	910
LO _{S4}	4.29	8.25	0.7	1500	8600	2000	70	870
LOF _{S5}	4.4	8.35	0.67	2000	10500	2000	70	820

Contenido elemental en la raíz del cultivo de Acelga

A partir del cuadro 7 se estable que el contenido de K superior se presento en el agua del TF_{S3} y el mas inferior en el lugar de la LO_{S4} con la presencia de carrizo.

El Magnesio presenta diferencia en los tratamientos del TA_{S2} y TF_{S3} con un valor de de 5600 y 5200 mg kg⁻¹, respectivamente el tratamiento de la LOF_{S5} tuvo menos presencia de Magnesio con un valor de 4300 mg kg⁻¹. El K presenta diferencia entre tratamientos, concentrándose más en los tratamientos del TF_{S3}, TI_{S1}, y TA_{S2}. Las menores concentraciones de K se presentan en los tratamientos T, LO_{S4} y LOF_{S5}. El Na presenta diferencia entre tratamientos, podemos observar que los valores encontrados son 8700, 10600, 18700, 16500, 14700 y 12600 mg kg⁻¹. En los tratamientos del TA_{S2} y TF_{S3} se encuentran los valores más altos de Na. Por el contrario los sitios T y LOF_{S5} tienen los valores bajos. El Fierro, muestra diferencia entre tratamientos, podemos observar que los tratamientos del T, LO_{S4} y TI_{S1} presentan valores de 600, 400 y 200 mg kg⁻¹. Los tratamientos TA_{S2}, TF_{S3} y LOF_{S5}

tienen valores iguales de 100 mg kg^{-1} . El Zinc presenta diferencia en los tratamientos del TF_{S3} y LOF_{S5} con valores de 40 y 20 mg kg^{-1} . En los tratamientos del T, TI_{S1} , TA_{S2} y LO_{S4} tiene un valor igual de 30 mg kg^{-1} . En Plomo, la diferencia se presenta en los tratamientos TI_{S1} y TF_{S3} con valores de 40 y 70 mg kg^{-1} . En los tratamientos del T, TA_{S2} , LO_{S4} y LOF_{S5} sus valores varían entre 50 y 60 mg kg^{-1} . Para el Cromo no se observan diferencias en los tratamientos. Ya que en todos los tratamientos tienen el mismo el valor de 100 mg kg^{-1} .

Los elementos cromo, plomo y calcio son elementos inmóviles, esto quiere decir que no se mueven a través del sistema de la planta (floema) por lo tanto los valores que presenta el Cuadro 7 por lo tanto esto se refiere a que estos elementos se concentran en la raíz de la planta.

Cuadro 7. Contenido de algunos elementos en raíz de acelga

Tratamiento	(mg kg ⁻¹)							
	Ca	Mg	K	Na	Fe	Zn	Pb	Cr
T	10000	4900	10900	8700	600	30	50	100
TI_{S1}	10000	4900	14500	10600	200	30	40	100
TA_{S2}	10000	5600	13300	18700	100	30	60	100
TF_{S3}	10000	5200	19100	16500	100	40	70	100
LO_{S4}	10000	4800	10300	14700	400	30	60	100
LOF_{S5}	10000	4300	10400	12600	100	20	50	100

Elementos en el tejido vegetal de Follaje

La absorción de elementos por parte de las plantas esta condicionada por el elemento, su concentración y disponibilidad, especie vegetal y su interacción con el suelo (Felipo, 2001).

En la Figura 2, se observa que no hay efecto significativo de ningún tratamiento en el contenido de calcio (Ca), del tejido vegetal de follaje; sin embargo, de manera gráfica se aprecia que con la adición de agua bruta, es decir no residual, el valor en ambos cortes, supero a todos los demás tratamientos.

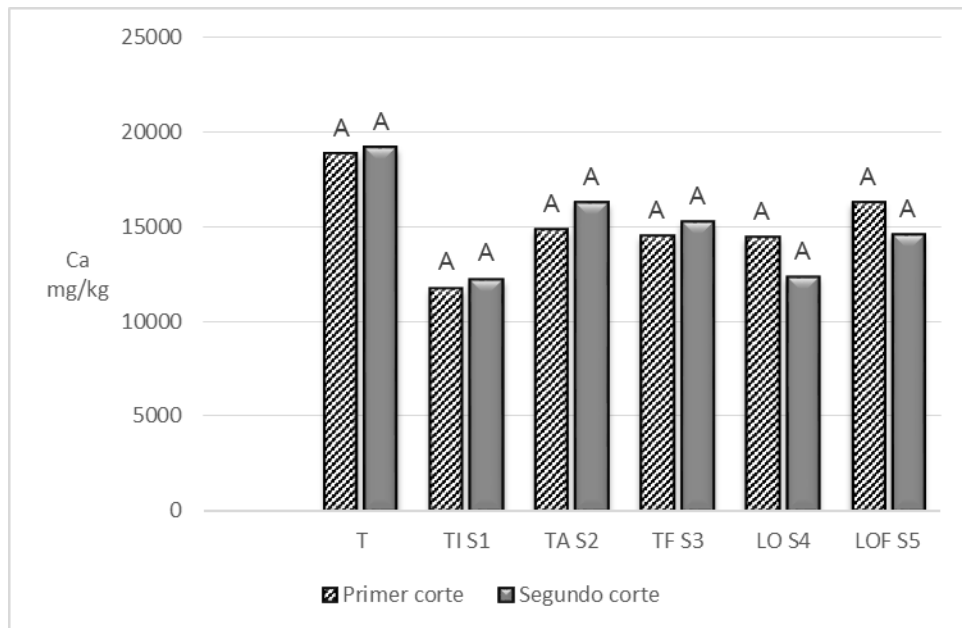


Figura 2. Concentración de Ca en el follaje del cultivo de acelga.

De igual manera que el elemento anterior, en el magnesio, no se presentó efecto significativo de las aguas residuales y solo con el tratamiento del TIS₁, el valor de este elemento fue el mas inferior ya que no sobrepasó los 6000 mg kg⁻¹ (Figura 3).

Además, el máximo valor permisible según (Reuter y Robinson, 1986) es de 8,000 mg kg⁻¹, por lo tanto los valores de ambos cortes se encuentran normales del presente trabajo de investigación.

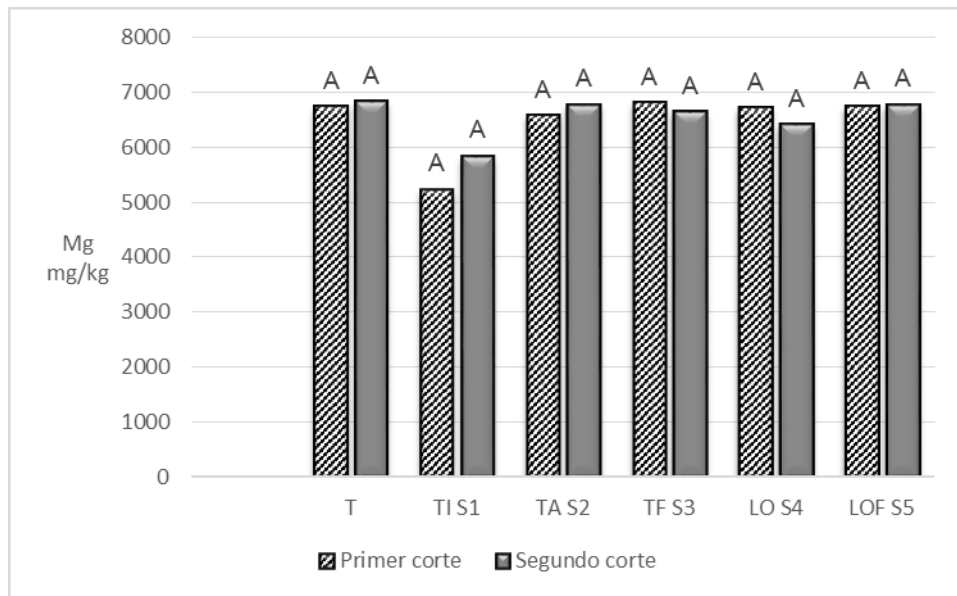


Figura 3. Presencia de Mg en el cultivo de acelga.

El Potasio presenta diferencia estadística significativa entre el tratamiento del TIS₁, con un valor de 24900 mg kg⁻¹, y el tratamiento de la LOS₄ con un valor de 33350 mg kg⁻¹, en el primer corte. El segundo corte no presenta diferencia estadística significativa entre tratamientos. (Figura 4).

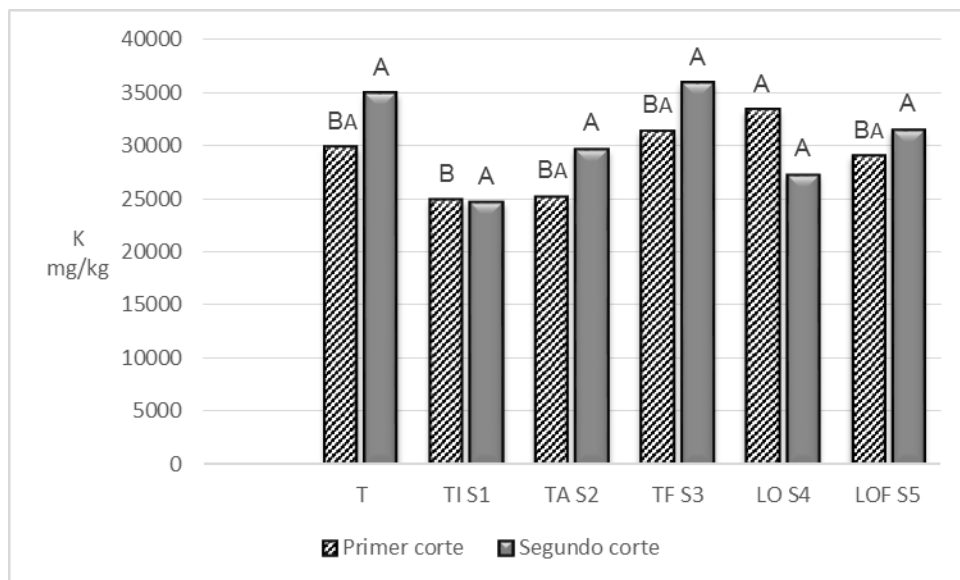


Figura 4. Concentraciones de K en el follaje del cultivo de acelga.

El Sodio presenta diferencia estadística significativa entre tratamientos, en el primer corte se presenta en los tratamientos del T y TI_{S1} con valor de 24350 y 23575 mg kg⁻¹ haciendo la diferencia con los tratamientos del TF_{S3}, LO_{S4} y LOF_{S5} con valor mas altos 33350, 38425 y 34525 mg kg⁻¹ respectivamente. En el segundo corte existe diferencia estadística significativa entre tratamientos del TI_{S1} y LOF_{S5} con valor de 27233 y 40200 mg kg⁻¹ respectivamente. El tratamiento de la LOF_{S5} fue donde mayor concentración se registro de Sodio. (Figura 5).

Reuter y Robinson, (1986) dicen que los niveles normales de Na en el tejido de la planta deben de ser de 34,200 mg kg⁻¹.

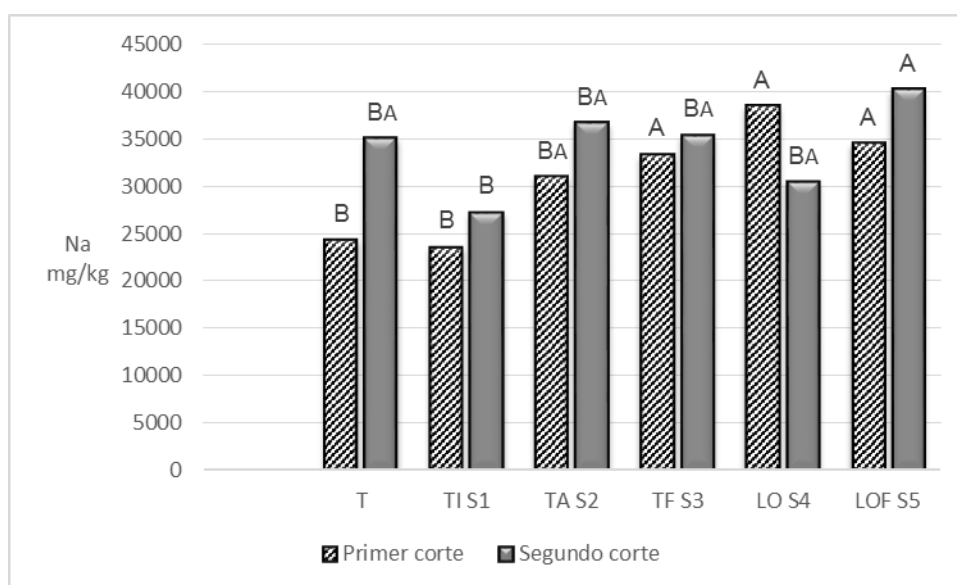


Figura 5. Concentración de Na en el follaje del cultivo de acelga

Con respecto al elemento hierro, este presenta diferencia estadística significativa en el primer corte, entre el tratamiento uno contra todos los demás, el valor mas elevado corresponde al tratamiento T con 600 mg kg⁻¹, los demás tratamientos no presentan diferencia estadística entre ellos. El segundo corte no presenta diferencia estadística significativa y en general los valores encontrados son más bajos que en el primer corte (Figura 6).

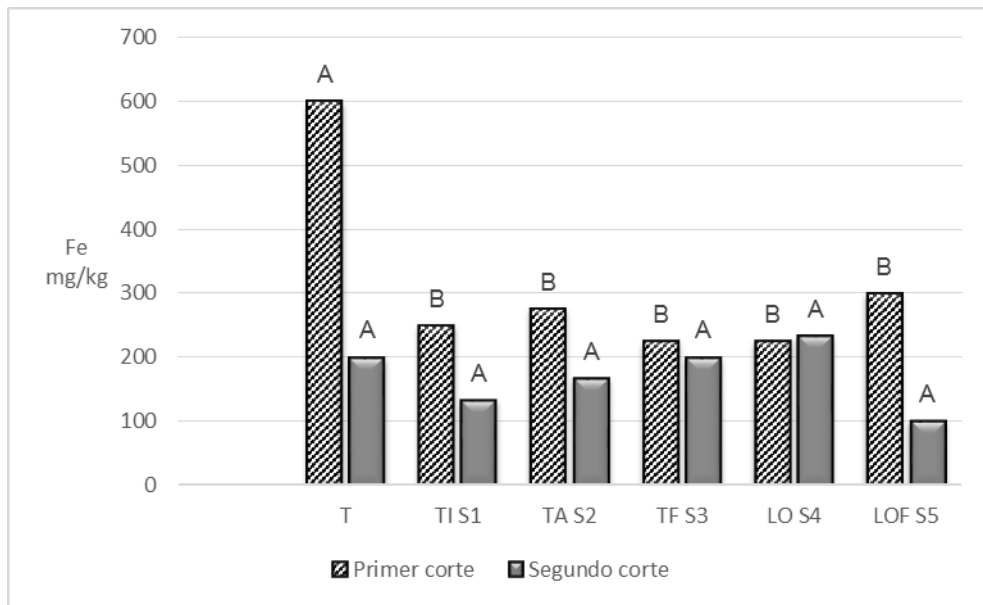


Figura 6. Efecto de tratamientos sobre la concentración de Fe en el follaje de acelga.

El Plomo presenta diferencia estadística significativa, en el tratamiento del TIS₁ con valor de 32.5 mg kg⁻¹ haciendo diferencia con el tratamiento del TAS₂ con valor de 65 mg kg⁻¹ del primer corte. El segundo corte no se observan diferencia estadística significativa entre tratamientos. (Figura 7).

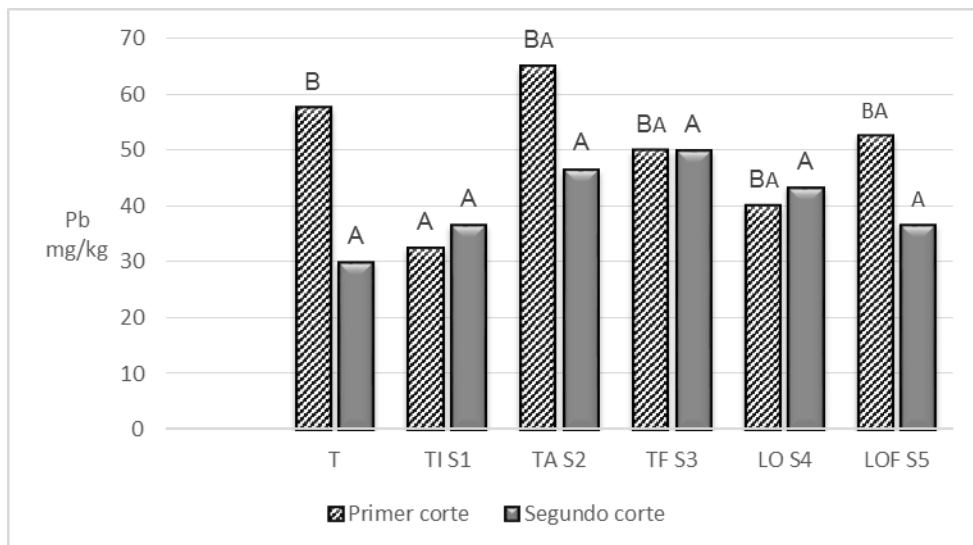


Figura 7 Concentración de Pb en el follaje del cultivo de acelga

Como se observa en la figura 8, el efecto de los tratamientos aplicados al cultivo de acelga, el elemento Zinc en el área foliar de esta planta no presenta diferencia estadística significativa en ambos cortes. El valor mas alto en el primer corte es de 57.5 mg kg^{-1} que corresponde al tratamiento del $\text{TA}_{\text{S}2}$. Por el contrario el tratamiento del $\text{TI}_{\text{S}1}$ presenta el valor mas bajo, $45. \text{ mg kg}^{-1}$. En el segundo corte el valor mas bajo se presenta en el tratamiento del T, con un valor de 46.6 mg kg^{-1} .

Coincidiendo con Navarro, et al., (2006), en una evaluación de metales pesados en un cultivo de remolacha, cultivada con residuos urbanos composteados no encontraron diferencias estadísticas para el Zn en el tejido vegetal de la planta

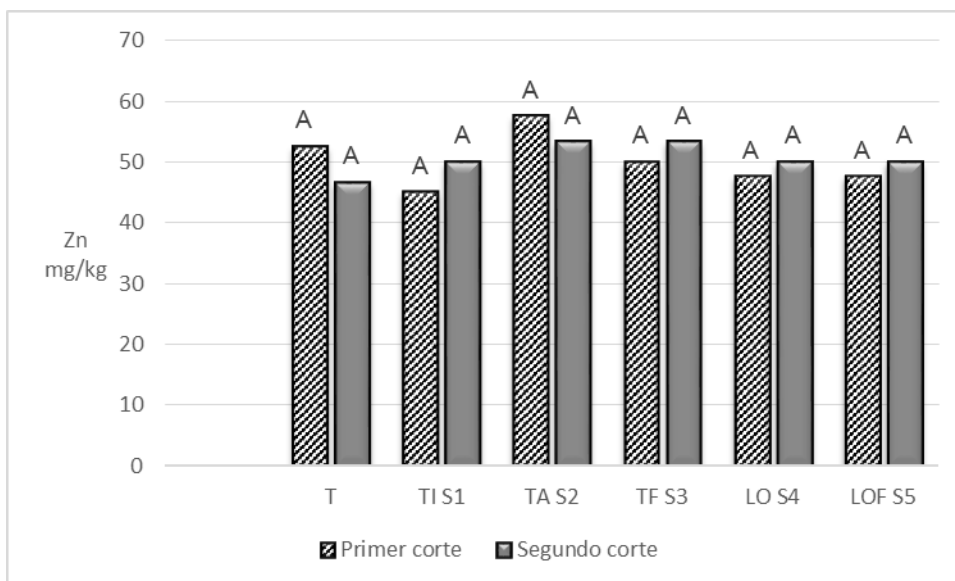


Figura 8 Presencia del elemento Zn en el follaje del cultivo de acelga

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en este trabajo de investigación y de acuerdo a los elementos encontrados en las aguas de los diferentes puntos de la PTAR se concluye que el agua residual de esta es apta para el uso en riego agrícola, ya que los elementos analizados se encuentran dentro de los máximos permisibles.

Sin embargo es importante señalar que se debe condicionar su uso y poner atención, debido al los valores altos de C.E, que la clasifican como altamente salina.

Además, se debe mencionar que el presente estudio es de un periodo relativamente corto como para encontrar acumulaciones importantes de algunos metales pesados como Fe, Zn y Pb, tanto en suelo como en planta.

En general los elementos esenciales Ca, Mg y K tienen un comportamiento de extracción relativamente uniforme al aplicar el agua de los diferentes puntos.

LITERATURA CITADA

- ✓ Alloway, B.J. 1995 Chapter 2: Soil process and the behavior of the heavy metals. In: Alloway, B.J. (ed.). Heavy metals in soils. Blackie Academic and Professional, London, 2nd edition. Pp.11-37.

- ✓ Alcantar, G. G. Etchevers, B. J. Aguilar, S. A. 1982. Los análisis físicos y químicos, su aplicación en la agronomía. 1ra edición, COLPOS, Montecillo, Edo de Mexico. Pp. 62-76.

- ✓ Angelova, V. Ivanova, R. Ivanov, K. 2005. Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, 03931, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-03931.

- ✓ Arce, V. A Calderón, M. C. Tomasini, O. A. 2010. Fundamentos técnicos para el muestreo y análisis de aguas residuales, IMTA-CNA, México.

- ✓ Basta N.T. 2004. Heavy metal and trace element chemistry in residual-treated soil: Implications on metal bioavailability and sustainable land application. In: Sustainable land application Conference, January, 4-8, Florida; University of Florida.

- ✓ Comisión Nacional del Agua 1995, *Programa hidráulico 1995-2000*, Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.

- Comisión Nacional del Agua. 2000. Guía para control de descargas a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. 1er. Edición. CNA. Pp.A4 8-17.

- Comisión Nacional de Agua. 2005. Estadísticas del agua en México. SEMARNAT. México
- ✓Comisión Nacional del Agua 2007. Programa Nacional Hídrico 2007-2012. SEMARNAT. México
- ✓Comisión Nacional del Agua 2009. Ley de aguas nacionales y su reglamento. 2da reimpresión. SEMARNAT. México
- ✓Comisión Nacional del Agua. 2006. Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento. SEMARNAT. México
- ✓Felipo, M. 2001. Los elementos potencialmente tóxicos como criterio en la aplicación de residuos orgánicos al suelo. Aplicación agrícola de residuos orgánicos Eds. J. Boixadera y M.R. Teira. Universidad de Lleida. Pg. 159-174.
- ✓Friedel J; Langer t; Siebe ch; stahr K. 2000. Effects of long-term waste water irrigation on soil organic matter, soil microbial biomass and activities in Central Mexico. *Biology and Fertility of Soils* 31: 414-421.
- ✓FIRA, 1998, La modernización del riego. Base de una agricultura competitiva y sustentable, *Boletín Informativo*, Núm. 303, Volumen XXXI.
- ✓Fair, G. M., Geyer, J. C., OKun, D. A. 1966. Water and wastewater engineering. Vol. 1. Water supply and wastewater removal. John Wiley Sons, Inc. Japan. pp:234-454.

- ✓Gutierrez-Ruiz, M. E.; Sommer, I.; Siebe, CH. 1995. Effects of land application of waste water from Mexico City on soil fertility and heavy metal accumulation: a bibliographical review. *Environmental Review* 3(3-4):318-330.

- ✓Gonzalez M., S. 1995. upper critical level for plants on copper-polluted soils and the effect of organic additions. In: Adriano, D.C.; Z-E. Chen, S-S. Yang, (eds.) *Biochemistry of trace elements*. Science and Technology Letters, Northwood. pp. 195-203.

- ✓Haq, A., Bates, T. y Soon, Y. 1980. Comparison of extractant for plant available Zinc, cadmium, nickel and cooper in contaminated soils. *Soils Science. Soc. Am. J* (44): 772-777.

- ✓Hernández H., L. 1988. Evaluación de las características de los suelos del Distrito de Riego 03, Tula, por el uso de agua residual en el riego agrícola. Tesis profesional. Instituto Politécnico Nacional. 112p.

- ✓Iannacon, O. y Alvariño, F. 2005. Efecto Ecotoxicológico de tres metales pesados sobre el crecimiento radicular de cuatro plantas vasculares. *Agricultura técnica*. 65 (2): 198-203.

- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 1994 Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento. 1ra edición IMTA, México. pp. 13-33.

- ✓Jackson, M. L. 1976. *Análisis Químicos de suelos*. 3ra edición. Ed. Omega, S.A. Barcelona España.

- ✓Jiménez, C.B.E. 2001. Contaminación del agua. La contaminación ambiental en México. Ed. Limusa, México, pp.13-33.

- ✓Juarez, M. Mijaylova, P. 2004. Tratabilidad de baños agotados del curtido de pieles para la recuperación de cromo trivalentes. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.

- ✓Jiménez C., B.; Siebe G., C.; Cifuentes G., E. 2005. EL Reúso Internacional y No Internacional del Agua en el valle de Tula. In: El agua en México vista desde la academia. B. Jiménez y L. Marín (eds.). Ed. Digital Academia Mexicana de Ciencias. Mexico, D.F. pp. 33-35.

- ✓Mara, D.D. 1976, tratamiento de aguas residuales en los climas cálidos, John Wiley & Sons, Londres.

- ✓Martinez, O. V. 2001. Utilizacion de aguas residuales en el cultivo y aprovechamiento de Kochia scoparia (L) (Schrad). UAAAN.

- ✓Mortvedt, J. J., Giordano, P.M. y Lindsay, W. L. 1983. Micronutrientes en la agricultura. Ed. A. G. T. Editores. México, D.F.

- ✓Metcalf; Eddy. 1998. Ingeniería de aguas residuales: tratamientos, vertido y reutilización. 3ª. Edición. Vol.I. McGraw-Hill. México. pp: 28-123.

- Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997. Que estable los limites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicio al publico. Diario Oficial de la Federación. México, D.F.

- Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996. Que estable los limites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Diario Oficial de la Federación. México, D.F.

- ✓Nalco Chemical Company. 1989. Manual de agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones, Tomo 1, Ed. Mc Graw Hill.

- ✓Navarro, M., López, J., Rad, C., Arribas, Y., Alonso, B., López, J., Fernández, M., Peña, S., Olalla, C., Bustillo, M. Y Gonzales, J. 2006. Aplicación compostaje de residuo urbano en el cultivo de remolacha (*Beta Vulgaris L.*) en la provincia de Burgos. WWW.YOSOYAGRICULTOR.ES

- ✓Ortega-Larrocea, M. P.; Siebe, C; Becard, G; Webster, R; Méndez, I. 2000. Impact of a century of wastewater irrigation on the abundance of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi in the Mezquital Valley of Mexico. *Applied Soil Ecology* 16 (2): 149-157.

- ✓Porta, J., López, M., Roquero, C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.

- Pérez, P. 2011. Metales pesados y calidad agronómica del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de la UAAAN. Tesis Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista Saltillo Coahuila, México.

- ✓Pérez, J., y Vallverdu, A. 2000. Reutilización de las aguas residuales de ciudad de Almería en los regadíos del bajo Andarax. 265-287 pp.

- ✓Peña de Paz, Francisco, 1997, Los límites del riego agrícola con aguas negras en el valle del Mezquital, Tesis de Maestría, Universidad Iberoamericana, México, Distrito Federal.

- ✓Prieto M, J; González R, C. A; Román G, D; Prieto G, F. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en las plantas por metales pesados provenientes de suelo y agua. *Tropical y Subtropical Agroecosistemas* 10:29-44.

- ✓Reuter, D.J. and Robinson, J.B. 1986. Plant Analysis. and interpretation. Manual. Inkata Press. Australia. 218 pp.
- ✓Reichaman M.S. 2002. The responses of plants to metals toxicity: A review focusing on copper, manganese and cinc. Autralian Minerals and Energy Evironment Foundation 54p.
- ✓Reynolds, K. A. 2002. Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica: Identificación de problema. Universidad de Arizona. USA. pp: 1-3.
- ✓Rodriguez O.J.C., J. L. Garcia H., R. D. Valdez C., J. L. Lara M., H. Rodriguez F., C. Loredó O. 2009. Calidad agronómica de efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Tropical y subtropical agro-ecosistemas. 10 (3): 355-367.
- ✓Ramírez, M W. 1999. Diseño de un modelo de saneamiento de suelo contaminados con metales pesados derivados de la explotación minera. Tesis profesional, maestría en ingeniería de proyectos. Universidad de Guadalajara, México.
- ✓Rosas, I; Báez, A; Coutiño, M. 1984. Bacteriological quality of crops irrigated with wastewater in the Xochimilco plots, Mexico City, Mexico. Applied and Environmental Microbiology 47(5): 1074-1079.
- ✓Siebe, C. 1994. Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelo regados con aguas residuales en el distrito de riego 03, Tula, Hidalgo, México. Revista Internacional de contaminación ambiental. Volumen 10, numero 1, pp. 15-21.
- ✓Seoanez, M. 1999. Aguas residuales: Tratamiento por humedales superficiales. Ediciones Mundi-Prensa. 49-95 pp.

✓Saldaña, F. M. Díaz, P. E. Gutiérrez, H. A. 2011. Diagnostico de la calidad del agua en un sistema de embalse en cascada, cuenca del rio San Juan, Querétaro, México. Tecnología y ciencias del agua. Antes ingeniería hidráulica en México. Vol. II, núm. 3, julio-septiembre, pp. 115-125.

Teuscher, H., R. Alder y P. J. Seaton. 1976. El suelo y su fertilidad. Ed. C. E. C. S. A. México, D.F.

✓Vazquez-Alarcon, A; Juntin-Cajustre, L; Siebe-Grabach, C.; Alcantar-Gonzalez, G; de la Isla de Bauer, M. de L. 2001. Cadmio, níquel y plomo en aguas residual, suelo y cultivos en el valle del Mezquital, Hidalgo, México. Agrocienza 3-5:267-274.

✓Yin; H.E Allen, Y. Li,. C.P. Huang, P.F. Sanders. 1996. Adsorption of mercury (II) by soil: effects of pH, chloride and organic matter. J. Environ. Qual. Vol. 25.pp. 837-844.

WHO (1996), *Analysis of Wastewater for Use in Agriculture*. A Laboratory Manual of Parasitological and Bacteriological Techniques. Geneva, Switzerland.

Consulta electrónica

✓INEGI, 2009. Estadísticas a propósito del día mundial del agua, datos nacionales.
<http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/español/prensa/default.asp?c=269&e=>