

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



**Impacto de la irrigación con agua residual sobre las propiedades
físicoquímicas del suelo**

Por:

ANDRES CARREON MORENO

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO

DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

**Impacto de la irrigación con agua residual sobre las propiedades
físicoquímicas del suelo**

POR:

ANDRES CARREON MORENO

TESIS


Que se somete a la consideración del h. jurado examinador como requisito
parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN


Aprobada por:



PhD. Vicente De Paul Álvarez Reyna
Presidente



MC. Edgardo Cervantes Álvarez
Vocal



MC. Felipe Zavala Borrego
Vocal



QFB. Lizet Hernández Herrera
Vocal Suplente



M. E. Javier López Hernández
Coordinador de la División Regional de Carreras Agronómicas



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

**Impacto de la irrigación con agua residual sobre las propiedades
físicoquímicas del suelo**

Por:

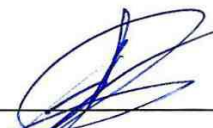
ANDRES CARREON MORENO

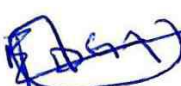
TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:


INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Aprobada por el Comité de Asesoría:


PhD. Vicente De Paul Álvarez Reyna
Asesor Principal


MC. Edgardo Cervantes Álvarez

Coasesor


MC. Felipe Zavala Borrego

Coasesor


M. E. Javier López Hernández
Coordinador de la División Regional de Carreras Agronómicas

Torreón, Coahuila, México

Septiembre de 2019



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por la preparación académica brindada.

Al establo "La Gallega", en especial al M.V.Z. Nicolás Sánchez y al Gerente Alejandro Carreón por permitirme realizar los trabajos pertinentes.

Al PhD. Vicente De Paul, por la transmisión de sus conocimientos, experiencia y apoyo para realizar esta tesis.

Al Dr. Jorge Luis Villalobos, por sus comentarios que enriquecieron la tesis y contribuyeron a mi formación. Por enseñarme que no sólo de teoría se nutre el científico.

A mi familia, Carreón y Moreno, quienes me apoyaron de principio a fin en la travesía de mis estudios.

A mi abuela María Flores que, aunque ya no está con nosotros siempre me apoyo.

A mi abuela María Atayde por su ayuda y palabras de aliento todos estos años.

Al Ing. Eliseo Raygoza Sánchez (†) por su ayuda y conocimientos transmitidos, un excelente maestro.

A la QFB. Norma Lydia Rangel Carrillo por su ayuda en laboratorio.

DEDICATORIA

A mis padres, Valente y Elvira.

A mis hermana, Valeria.

RESUMEN

El tratamiento y reusó del agua residual juegan un papel fundamental en la administración y manejo de este recurso en todos los países. Los tipos de reusó más comunes son el aprovechamiento del agua tratada en actividades agrícolas, a pesar de la importancia del riego agrícola y su potencial impacto en la salud humana y ambiental, no existe seguimiento y evaluación de los impactos relacionados con el uso de aguas residuales en la agricultura, como son: salinización del suelo, contaminación de agua superficial y subterránea, fijación y migración de contaminantes en suelo y planta, el experimento se realizó en las parcelas del establo la Gallega, del municipio de Gómez palacio, Durango con el objetivo de ver el comportamiento del uso del agua residual generada en el establo sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo. Se tomaron muestras de suelo a las cuales se realizó un análisis completo en el laboratorio de suelos de la universidad autónoma agraria Antonio narro unidad laguna en los cuales se determinaron: pH, CE, MO, Ca, Mg, Na, Cl, N, P, etc. El propósito de este trabajo fue determinar el efecto del uso de agua residual utilizada en el riego sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo. Los resultados evaluados muestran que el riego continuo con esta agua afectó las propiedades fisicoquímicas del suelo.

Palabras claves. Agua residual, Sales, Suelo, Toxicidad, Establos lecheros

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	<i>i</i>
DEDICATORIA.....	<i>ii</i>
RESUMEN.....	<i>iii</i>
ÍNDICE DE CUADROS.....	<i>vii</i>
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL.....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
HIPÓTESIS.....	4
REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
Problema del agua en México.....	5
Calidad del agua.....	6
El riego con agua residual en México	7
Establos lecheros.	9
Marco legal.....	11
Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996.	11
Aspectos de riesgo.....	13
Cloruros:.....	14
Nitratos:.....	14
Metales pesados.....	14
RAS.....	15

PSI.....	16
pH	16
CE.....	17
Salinidad.....	18
Sodicidad.....	19
Tolerancia a la salinidad.....	20
MATERIALES Y MÉTODOS	22
Descripción de la zona de estudio.....	22
Propiedades fisicoquímicas del agua de riego.	22
Tratamientos.	23
Variables evaluadas	24
Muestreo de suelo	25
Muestreo de agua.....	25
Diseño experimental.....	25
RESULTADOS.....	26
Análisis de agua residual y cumplimiento de la norma oficial mexicana.	26
Parámetros fisicoquímicos del suelo.....	27
pH	27
CE.....	28
MO.....	28

Calcio.....	29
Magnesio.....	29
Sodio.....	30
Carbonatos	30
Bicarbonatos.....	31
Cloruros.....	32
RAS.....	32
PSI.....	33
CONCLUSIÓN.....	35
BIBLIOGRAFIA	36

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1 LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS QUE DEBEN SEGUIR LOS ESTABLOS CON DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES A BIENES NACIONALES.....	12
CUADRO 2. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL AGUA DE RIEGO.	23
CUADRO 3. TRATAMIENTOS.	23
CUADRO 4. VARIABLES EVALUADAS EN EL AGUA.....	24
CUADRO 5. ANÁLISIS QUÍMICO DEL AGUA RESIDUAL DEL ESTABLO COMPARADO CON LOS LÍMITES INDICADOS EN LA NOM-001-SEMARNAT-1996.....	26
CUADRO 6. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL SUELO.	27

INTRODUCCIÓN

El tratamiento y reusó del agua residual juega un papel fundamental en la administración y manejo de este recurso en todos los países. Los tipos de reusó más comunes son el aprovechamiento de agua tratada en actividades agrícolas, industriales, recreativas y recarga de acuíferos. El problema frecuente en el caso del riego de cultivos, es que generalmente no se especifica con qué calidad química se debe utilizar el agua, sino que solamente se da importancia a la calidad agronómica determinada por: cultivo a regar, condiciones climatológicas, métodos de riego, condiciones de drenaje del suelo y prácticas de manejo de agua, suelo y plantas. Sin embargo, a pesar de la importancia del riego agrícola y su potencial impacto en la salud humana y ambiental, no existe seguimiento y evaluación del impacto relacionado con el uso de agua residual en la agricultura, como son: salinización del suelo, contaminación de agua superficial y subterránea, fijación y migración de contaminantes en suelo y planta, y su eventual impacto por consumo de alimentos por parte del ser humano. En las zonas áridas y semiáridas el recurso agua de buena calidad está volviéndose más escasa y se asigna con prioridad a satisfacer la demanda urbana. Razón por la que se está incrementado la necesidad de regar con agua que tiene contenido de sales, las cuales pueden ser de origen subterráneo, agua residual cruda o tratada. La mala calidad del agua disminuye su disponibilidad, de modo que esta es una de las causas de la escasez del recurso. La afirmación de que la crisis del agua no es un problema de escasez sino de gestión implica que los procesos de gestión no son solamente de almacenamiento y distribución, sino que también debe atenderse el cuidado de la calidad del recurso y su administración. La superficie irrigable en la Comarca Lagunera es de aproximadamente 150 000 ha de las cuales

más de 12% están afectadas en diversos grados por sales o sodio, ya que en ella convergen: presencia de material aluvial original rico en sales, uso de agua de riego de mala calidad que aporta una gran cantidad de sales, uso de suelo arcilloso sensible a la salinización, fuerte intensidad de explotación de agua y suelo durante todo el año. La reutilización de aguas residuales tratadas en el riego agrícola garantiza una fuente constante y segura del líquido aun en los años más secos, aporte continuo de nutrientes y micro elementos para las plantas, ahorro en gastos de fertilización, y sobre todo coadyuvar en la eliminación del riego con aguas negras y sustentabilidad del sistema.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la aplicación continua de agua residual generada en el "establo la Gallega" sobre las propiedades físico químicas del suelo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.- Evaluar la calidad del agua residual generada en el establo.
- 2.- Evaluar el uso de agua residual en la irrigación de cultivos sobre las propiedades físico químicas del suelo.

HIPÓTESIS

La exposición continua del suelo al riego con agua residual afecta las propiedades fisicoquímicas del suelo.

REVISIÓN DE LITERATURA

Problema del agua en México.

El agua es importante para el mantenimiento de la vida en el planeta, su funcionalidad biológica la hace indispensable para la creación y sobrevivencia de todos los seres vivos además de ser un pilar del desarrollo (Toledo, 2002).

El crecimiento poblacional e industrialización dieron como resultado un incremento en la demanda del líquido, así como una mayor dispersión de las zonas urbanas en sitios desprovistos de agua, con un incremento en la necesidad de desarrollar más infraestructura para continuar abasteciendo la demanda de la población (Tamariz, 1996).

En México, cerca del 77 % del agua es utilizada en la agricultura, 14 % en abasto público, 4 % en la industria y 5 % en la energía eléctrica (CNA 2013).

Uno de los principales problemas en la Comarca Lagunera de Durango y Coahuila, es la falta de disponibilidad de agua, lo cual se agudiza en los periodos secos, con el consecuente efecto en la recarga del acuífero.

Esta región se caracteriza por su actividad agropecuaria, de acuerdo con estadísticas del 2015, ocupando el primer lugar en población de bovino lechero y producción de leche, cuya población asciende a 443,526 cabezas de ganado distribuidas en ambos estados (SIAP, 2015), que producen anualmente cerca de un millón de toneladas de estiércol, aplicado de forma directa a los suelos agrícolas.

Esto conlleva a un consumo de agua excesivo lo cual lleva a que los acuíferos de la zona se encuentren en un nivel de abatimiento muy alto. De los 653 acuíferos,

101 están sobreexplotados, con una recarga natural de 800 Mm³ en el acuífero principal, ante una extracción aproximada de 1252 Mm³ y un abatimiento promedio de 1.3 m por año (CONAGUA 2010).

Las actividades agrícolas demandan gran cantidad de agua y se tiene necesidad de tener un abastecimiento regular que compense la escasez del recurso. Debido a ello, se han desarrollado grandes distritos de riego a partir del residual en las zonas agrícolas cercanas a la mayoría de las ciudades. En México, se estima que se riegan cerca de 350,000 ha de suelo agrícola con agua residual, algunos ejemplos de ello, los podemos observar en ciudades, como León, Toluca, Cd. Juárez, Morelia, Durango, Cd de México, valle del Mezquital en Hidalgo y el Valle de Atlixco en Puebla; donde se siembran hortalizas, cultivos de consumo básico (maíz, tomate, jitomate, cebolla, cilantro, acelga, ajo, ejote, rábano, col y plantas ornamentales (Mendez-Garcia *et al.*, 2000).

Calidad del agua.

La tendencia actual de evaluación de la calidad del agua para propósitos de riego es más cualitativa que cuantitativa, evitando el uso de clasificaciones rígidas y refiriéndose a cada caso en una forma elástica y particular ya que el agua es un recurso cada día más escaso que debe ser manejado cuidadosamente dependiendo de las condiciones ambientales, tipo de suelo, cultivo, condiciones económicas y sociales de los agricultores (Ayers y Westcott 1987).

Por otra parte, la calidad del agua también es resultado de la actividad humana, los diferentes procesos industriales, urbanos o agrícolas vierten diversos tipos de sustancias en concentraciones tales que la naturaleza no es capaz de incorporarlos al

medio ambiente, este problema ocasiona que el agua aunque esté disponible, no pueda ser utilizada y no sólo esto, sino que también su condición de deterioro afecte al ecosistema (Monforte *et al*; 2009).

La mala calidad del agua disminuye su disponibilidad, de modo que esta es una de las causas de la escasez del recurso. La afirmación de que la crisis del agua no es un problema de escasez sino de gestión implica que los procesos de gestión no son solamente de almacenamiento y distribución, sino que también debe atenderse el cuidado de la calidad del recurso y su administración.

El uso de agua de mala calidad puede ocasionar problemas en el suelo y cultivos; estos pueden ser problemas de salinidad; disminución de la tasa de infiltración, toxicidad específica sobre los cultivos y otros (Moreno y Moral 1996).

Otro aspecto importante es la falta de legislación con relación a desechos industriales al drenaje, el manejo de los lodos de tratamiento y deficiencia en los métodos de medición y monitoreo (Carabias y Landa, 2005).

El riego con agua residual en México

La aplicación de agua residual (AR) a terrenos agrícolas para riego, aprovechando su aportación de nutrientes, o para su eliminación evitando la contaminación de ríos, es una práctica realizada desde la antigüedad por griegos, romanos y habitualmente China, Inglaterra o Alemania desde el siglo XVI. La aplicación en riego del agua residual es un sistema alternativo de depuración, como mecanismo eficaz para regular los recursos hídricos en zonas muy deficitarias (Antonio, 2015).

La elevada demanda de agua para riego convierte el aprovechamiento del agua residual en una fuente inestimable de este recurso (Pérez y Vallverdu, 2000). La

superficie dedicada a las labores agrícolas en México varía entre los 20 y 25 millones de hectáreas, con una superficie cosechada de entre 18 a 22 millones de hectáreas por año (CONAGUA, 2012).

El riego, es posible con el empleo de prácticamente cualquier tipo de agua, a pesar de las malas características que esta pueda tener, siempre que se tomen en cuenta la planificación de las normas de riego (Ortega y Orellana 2007).

Algunas posibilidades que ofrece la utilización de aguas residuales en el riego de los cultivos son: contribuyen al aumento del 20% de la disponibilidad de productos agrícolas frescos, ahorro del 10% de fertilizante, debido al valor nutritivo de esta agua, y disminuye al 60% los gastos por concepto de transporte y otros insumos (Pérez y Hernández 2007).

En México, es escasa la investigación sobre el aprovechamiento de los nutrimentos, la evaluación de la calidad sanitaria en ciertos cultivos, y las propiedades físicas y químicas de suelo debido al riego con agua residual (Rascón et al., 2005).

Sin embargo, a pesar de la importancia del riego agrícola y su potencial impacto en la salud humana y ambiental, no existe seguimiento y evaluación de los impactos relacionados con el uso de aguas residuales en la agricultura, como son: salinización del suelo, contaminación del agua superficial y subterránea, fijación y migración de contaminantes en suelo y planta, y su eventual impacto por consumo de alimentos por parte del ser humano (Normas OPS y EPA, 2014).

Los procesos de tratamiento suponen inversiones de capital elevadas y costos de operación altos que la mayoría de las comunidades no están en capacidad de asumir ni de financiar (ROMERO J.A., 2000).

Establos lecheros.

La obtención de leche de calidad está sujeta a varios factores, siendo especialmente dos los que tienen relación directa con la calidad del agua: uno es mantener una adecuada salud animal y otro el sostener las condiciones de higiene, tanto de las instalaciones, como de los implementos que maneja el ordeñador (National Academy of Science, 1974; Misas Restrepo, 1998).

El sistema de producción animal intensiva adoptado, causa un deterioro ambiental grave en aire, agua y suelo. Las causas son la concentración de animales y frecuente falta de espacio, inducidas para obtener mayores rendimientos productivos, lo que genera gran acumulación de residuos, principalmente heces y orina difíciles de eliminar (Leff, 1990; Chauvet, 2001).

Los problemas medioambientales más importantes derivados de la producción lechera tienen que ver con la contaminación del aire, agua y biodiversidad.

El agua residual proveniente de la ganadería tiende a ser más concentrada que la doméstica y exhibe un amplio rango de contaminantes y características fisicoquímicas que pueden influir en el sistema de tratamientos, por lo cual es importante contemplar las características de los desechos si se busca su reutilización y en base a estos establecer su manejo y posterior tratamiento (Sukias y Tanner, 2005).

La industria lechera de esta región genera 10,000 empleos directos y mil seiscientos millones de litros de leche por año (SIAP, 2009). Esta población de ganado demanda para su alimentación alrededor de 3, 000,000 de toneladas de forraje verde anualmente, siendo la alfalfa la principal fuente de este insumo.

Los establos lecheros tienen un volumen total concesionado de 416,355 m³ por el año, equivalente a 34,696 m³ al mes. De lo cual, la CONAGUA en conjunto con los establos lecheros, consideran que se gasta un 10 por ciento del volumen concesionado en el lavado de los corrales, es decir, 3470 m³/mes sería la descarga de agua residual de los establos lecheros. Este valor indica que anualmente se descargan, por lo menos, 41,640 m³ de agua residual proveniente de los establos lecheros de Tijuana (CESPT, 2007).

La excreta del ganado está compuesta por heces y orina, los cuales aportan materia orgánica y nutriente a su composición. La composición de las heces es variable en función del estado fisiológico, alimentación, estado productivo y se puede medir a través de diversas pruebas de laboratorio.

La reducción del nocivo impacto medioambiental de la producción lechera, en particular el relacionado con la contaminación del agua y emisiones de amoníaco, es el principal objetivo de las medidas políticas agroambientales que encuentra el sector lechero (OCDE, 2004).

En México por la importancia de volumen aportado respecto al nacional la producción lechera se concentra en cuatro cuencas: La laguna (Coahuila y Durango), Los altos de Jalisco, Tiza yuca (Hidalgo) y valle de México y las zonas aledañas al Distrito Federal (Puebla y Estado de México), así como el norte de Veracruz (Cervantes *et al.*, 2001).

La producción de leche en México se concentra mayormente en Jalisco, Coahuila, Durango, Chihuahua y Guanajuato, los cuales producen 55 por ciento de la producción nacional total (SIAP, 2010).

La producción de leche en México es una agroindustria de relevancia para el país y a nivel mundial. En 2008 se produjeron en México 10 mil 600 millones de litros de leche con un valor de 46 mil millones de pesos, con lo cual ocupó el lugar número 18 en producción a nivel mundial.

Marco legal

La contaminación generada por la producción pecuaria en México, está regulada únicamente por leyes ambientales que se enfocan en la descarga de agua residual en los acuíferos. En general, las leyes regulan principalmente la contaminación del agua a través del mecanismo llamado de “comando y control”, que exige un pago por contaminar (Vázquez, 2010).

Las leyes relacionadas con la contaminación generada en los establos son La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), la Ley de Aguas Nacionales y la Ley Federal de Derechos en Materia del Agua. De igual forma, la Ley Federal sobre Metrología y Normalización se vincula con la Norma denominada NOM-001-ECOL-1996, para establecer los límites de contaminación.

Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996.

Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (Cuadro 1). Señala que los contaminantes básicos a medir son: grasas y aceites, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno total, temperatura y pH (NOM-001-ECOL-1996).

Cuadro 1 Límites máximos permisibles para contaminantes básicos que deben seguir los establos con descargas de aguas residuales a bienes nacionales.

Parámetros a medir (mg/litro, excepto cuando se especifique)	Uso en riego agrícola (A)	
	P.M	P.D
Grasas y Aceites	15	25
Sólidos suspendidos totales	150	200
Demanda bioquímica de oxígeno	150	200
Nitrógeno Total	40	60
Arsénico	0.2	0.4
Plomo	0.5	1
Cadmio	0.2	0.4
Cobre	4.0	6.0
Zinc	10	20

Uso en riego agrícola (A), (P.M) Promedio mensual, (P.D.) Promedio diario.

La norma establece también que los responsables de la descarga de agua residual que rebase los límites permisibles deben presentar un programa de las acciones u obras a realizar para el control de la calidad de sus descargas a la comisión nacional del agua (CONAGUA, 2017).

El responsable de la descarga queda también obligado a realizar el monitoreo de las descargas de agua residuales para determinar el promedio diario y mensual. La periodicidad de análisis y reportes puede ser trimestral, semestral o anual. Dependiendo de la carga contaminante que presenten (Pérez, 2012).

De acuerdo con la CONAGUA, con esta legislación en marcha, la carga del sistema es ahora más flexible, puesto que los criterios consideran la capacidad asimilativa del cuerpo de agua y las concentraciones de los indicadores de

contaminación. Sin embargo, reconocen que no existe la capacidad para el monitoreo y control constante de las actividades de descarga por parte de las instituciones (Seroa da Motta *et al.*, 2000).

Aspectos de riesgo.

El uso ineficiente del agua conlleva a una baja sustentabilidad del distrito de riego de acuerdo a los siguientes indicadores: baja productividad, desperdicio de agua, conflictos sociales, degradación del suelo, conservación y rehabilitación insuficiente de infraestructura hidráulica, falta de una cultura del agua, sobre concesión de derechos, insuficiente tecnificación, falta de seguridad jurídica de derechos de agua, falta de cultura ambiental e insuficiente planeación y coordinación intersectorial (CNA, 2003).

Sin embargo, a pesar de la importancia del riego agrícola y su potencial impacto en la salud humana y ambiental, no existe seguimiento y evaluación de los impactos relacionados con el uso de agua residual en la agricultura, como son: salinización del suelo, contaminación de agua superficial y subterránea, fijación y migración de contaminantes en suelo y planta, y su eventual impacto por consumo de alimentos por parte del ser humano.

La producción animal moderna es un negocio sofisticado y tanto el tratamiento como la valoración de los residuos tienen que estar acorde con la bioseguridad, bienestar animal, ética y el medio ambiente (Martinez-Almela *et al.*, 1990). En años recientes el aumento en el conocimiento de los efectos acumulativos de la contaminación causada por la descarga de residuos industriales sólidos, líquidos y gaseosos han llevado a una mayor preocupación general y a una legislación cada vez más estricta (Winkler, 1999).

Cloruros:

Los cloruros se caracterizan por una alta solubilidad y alta toxicidad. Sinérgicamente con los sulfatos, los cloruros son los responsables de la salinización de los suelos (Sánchez *et al.*, 2015).

Nitratos:

Sales del ácido nítrico que se acumulan en el suelo, pero siempre en bajas cantidades. Los nitratos representan la principal fuente de nutrición mineral de los cultivos. En regiones áridas los nitratos de sodio y potasio se acumulan del mismo modo que los cloruros de sodio y potasio. Los nitratos en suelos a concentraciones superiores del 0.1% poseen más toxicidad que los cloruros (Peinemann, 1998).

Metales pesados

El suelo es considerado un recurso natural frágil y no renovable, debido a que resulta difícil y costoso recuperarlo o, incluso mejorar sus propiedades después de haber sido alterado. Realiza un gran número de funciones clave tanto ambientales, como económicas, sociales y culturales que son esenciales para la vida (SEMARNAT, 2005).

Los metales pesados contribuyen fuertemente a la contaminación ambiental, la cantidad de metales disponibles en el suelo está en función del pH, contenido de arcillas, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y otras propiedades que las hacen únicas en términos de manejo de la contaminación (Sauve y Allen, 2000).

La contaminación química a partir de agua contaminada, es a través de la cadena alimenticia, mediante la absorción de elementos químicos que realizan las

plantas a través del suelo, como pueden ser metales pesados (Cd, Pb y As), los cuales están disponibles tanto para los herbívoros como para el ganado y el propio ser humano (Prieto-Méndez et al. 2009). Dentro de los metales pesados hay dos grupos:

A. Oligoelementos o Micronutrientes. - Requeridos en pequeñas cantidades por plantas y animales, y son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital, pasando cierto umbral son tóxicos. En este grupo se encuentran: As, B, Co, Cr, Mo, Mn, Ni, Se, Zn (Dorronsoro, 2001; Nedelkoska y Doran, 2000).

B. Metales pesados sin función biológica conocida. - La presencia en determinadas cantidades en seres vivos lleva a disfunciones en el funcionamiento de sus organismos. Resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos, principalmente: Cd, Hg, Pb, Cu, Sb, Bi (Maqueda, 2003).

Los metales pesados más peligrosos son el plomo (Pb), Mercurio (Hg), Arsénico (As), Cadmio (Cd), Estaño (Sn), Cromo (Cr), Zinc (Zn) y Cobre (Cu). Estos metales son muy utilizados en la industria y también se emplean en ciertos plaguicidas y medicinas al igual que en agua residual (Nebel y Wright, 1999).

RAS

Uno de los iones que favorece la degradación del suelo es el sodio que sustituye al calcio en suelos de zonas áridas; situación que da lugar a una dispersión de los agregados del suelo y pérdida de la estructura, por lo que el suelo pierde rápidamente su permeabilidad (Hanson, 1993). La fórmula utilizada para la determinación del RAS es la siguiente:

$$\text{RAS} = \frac{Na}{(Ca+Mg)^{\frac{1}{2}}}$$

Donde el RAS: Relación de Absorción de Sodio, Na: sodio, Ca + Mg: contenido de calcio más magnesio del suelo.

PSI

Una medida relativa utilizada para conocer la cantidad de sodio adsorbido por el suelo es la determinación del porcentaje de sodio de intercambio (PSI). Los suelos sódicos se forman por acumulación de sodio en el complejo de cambio, afectándose por ello la estructura del suelo.

Los investigadores del U.S. Salinity Laboratory (1954) desarrollaron la siguiente ecuación para calcular el PSI a partir del RAS.

$$PSI = \frac{100 (-0.0126 + 0.01475 RAS)}{1 + (-0.0126 + 0.01475 RAS)}$$

Se establece entre los dos criterios anteriores de salinidad y sodicidad, CE y RAS, una clasificación para las aguas en dieciséis tipos diferentes denominados C-S que se ha estado utilizando durante varios años.

pH

El pH es el nivel de iones de hidrogeno disueltos en el agua, si el pH es igual a 7 entonces el agua es neutra, si el pH es menos de 7 el agua es acida y si el pH es mayor de 7 el agua es básica o alcalina (Obregón, 2005).

El pH está relacionado con la absorción y disponibilidad de los nutrientes para la planta, sobre todo de fósforo y micronutrientes (Ramos-Leal *et al.*, 2016).

La concentración del ion hidrogeno es un importante parámetro de calidad del agua residual, esta, con una concentración adversa de iones hidrogeno es difícil de

tratar por medios biológicos, el pH es un sistema acuoso puede medirse convenientemente con un medidor del potencial hidrogeno (Talarico et al., 2007).

El pH óptimo para suelos agrícolas debe variar entre 6,5 y 7,5 para obtener mejores rendimientos y mayor productividad (Romero *et al.*, 2009). A mayor pH la erosión del suelo se incrementa (Vitoria *et al.*, 2007).

CE

La conductividad eléctrica mide la capacidad del suelo para conducir la corriente eléctrica al aprovechar la propiedad de las sales en la conducción de esta; por lo tanto, la conductividad eléctrica mide la concentración de sales solubles presentes en la solución del suelo (Castellanos, 2000).

La estimación del contenido de sales en un suelo guarda relación con el comportamiento de los cultivos frente a estas sales, por lo cual, la planta requiere una energía potencial para absorber el agua del suelo a través de sus raíces, cuantas más sales aparezcan disueltas en el suelo mayor energía necesitara el cultivo a causa de la presión osmótica generada por la mera existencia de compuestos en solución (Havlin, 2013).

El tener en consideración estos aspectos permite usar la CE para determinar directamente el efecto de la salinidad sobre el rendimiento de los cultivos (Richards, 1982).

La relación conductividad eléctrica-germinación cuanto mayor es la conductividad eléctrica el porcentaje de germinación de semilla de maíz (*Zea mays L.*) disminuye (Vitoria *et al.*, 2007).

Salinidad

La salinidad es común en las regiones áridas y semiáridas del mundo donde la evapotranspiración excede a la precipitación, en estas regiones es necesario recurrir a la irrigación para satisfacer las necesidades de agua de los cultivos. Cuando las sales solubles se concentran en el perfil del suelo se producen condiciones que afectan el crecimiento normal de las plantas. Los efectos de estas condiciones son diversos y la intensidad de éstos depende de la cantidad y tipo de sales predominantes, factores de suelo, clima y drenaje.

La salinización se refleja en un incremento en la conductividad eléctrica de la solución del suelo que tiene efectos adversos sobre las propiedades físicas y químicas del suelo, dificulta el crecimiento y productividad vegetal (Tejada *et al.*, 2006).

Los efectos de la salinización para la agricultura pueden ser muy graves, tanto en términos económicos como sociales, en cuanto se relaciona con la pérdida de suelo agrícola. Algunos de estos efectos son: la pérdida en su fertilidad, disminución de la infiltración, toxicidad para algunos cultivos de algunas sales. Igualmente reduce el crecimiento de las plantas y limita su productividad (Amezketta, 2005).

El principal efecto del estrés salino es una reducción del crecimiento foliar. Además, en gramíneas, el macollaje se reduce, esta variable es un componente importante de la acumulación de biomasa (Maas *et al.*, 1994; Munns y Tester, 2008).

Las principales sales que afectan a los cultivos y que se encuentran en el suelo corresponden a cloruros y sulfatos de sodio, calcio, magnesio y potasio (Munns *et al.*, 2005), siendo para las plantas los principales iones citotóxicos Na^+ , Cl^- y SO_4^- (Chinnusamy *et al.*, 2005).

El uso indiscriminado de aguas residuales crudas o tratadas en el riego agrícola resulta en un aporte gradual de Na^+ en el complejo de intercambio de los suelos, derivado de su alta concentración en NaHCO_3 y NaCl , que en la solución edáfica inducen con el tiempo la perturbación física y química de los suelos y por ende, generan consecuencias adversas en las relaciones agua-suelo-planta aun cuando los valores de PSI sean menores de 15 % (Velázquez *et al.* 2002).

El uso de agua residual tratada como agua de lavado tiene la ventaja de aportar materia orgánica al suelo, pero la desventaja de incrementar el PSI es que en el tiempo destruye la estructura del suelo, incrementa el nivel salino de la solución y dificulta la eficiencia de lavado si el suelo no cuenta con adecuado drenaje natural o artificial (Villafañe *et al.* 2002).

El diagnóstico de los problemas de salinidad potencial existente se hace con base en el análisis del extracto de saturación del suelo y del agua de riego y drenaje. En ellos los principales parámetros predictivos son la conductividad eléctrica (CE) y la relación de adsorción de sodio (RAS).

Sodicidad

La salinidad y sodicidad de los suelos son las principales restricciones para la producción agrícola y ganadera (Taleisnik *et al.*, 2008). Los efectos de la elevada concentración de sales en el suelo sobre las plantas se expresan de varias formas.

Cuando la sodicidad se encuentra presente en el suelo se incrementa la presión osmótica del agua del suelo, lo que impide su aprovechamiento por parte de las raíces y se genera además un desbalance nutricional, provocando toxicidad y deficiencias en las plantas (Mau y Porporato, 2015). Las características del suelo son factores

determinantes en la sodicidad de los mismos, ya que el uso de agua de riego con alto contenido de carbonatos de sodio, carbonatos de calcio y magnesio presentan elevado riesgo de generar sodicidad (Chhabra, 1996).

El riesgo de sodificación en el suelo, sobre todo en la capa superficial, se incrementa conforme se prolonga el periodo de años con riego de agua de pozo profundo con concentraciones medias (750-1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y altas (1500-3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) de Na^+ lo que propicia un impacto negativo en los cultivos (Bonet-Pérez *et al.* 2011).

El exceso de sales puede ser perjudicial para las plantas mientras que altos contenidos de sodio intercambiable pueden provocar daños físicos y químicos en el suelo, afectando el crecimiento de los cultivos. Los suelos alcalinos ($\text{PS} > 15$) presentan niveles de pH entre 8,5 a 10 o más; en ésta situación se favorece la dispersión de los coloides del suelo, provocando ruptura de agregados con la consecuente pérdida de estructura y obstrucción de los poros, por lo que las propiedades hidráulicas se deterioran: disminuye la infiltración y conductividad hidráulica saturada (Brady & Weil, 1999).

Tolerancia a la salinidad

La tolerancia a salinidad en la germinación de muchas especies no está consistentemente relacionada a la tolerancia durante la emergencia, crecimiento vegetativo, floración y fructificación. Así, por ejemplo, betarraga, cebada y algodón, cultivos tipificados como de alta tolerancia a las sales, son relativamente sensibles durante la germinación y en el estado de plántula. Otras especies como el maíz, arvejas y habas son más sensibles durante estados más avanzados de desarrollo (Pessarakli, 1994).

Los rasgos fisiológicos más asociados a la tolerancia, salinidad en gramíneas son la exclusión del ion, la tolerancia de los tejidos al sodio y ajuste osmótico (Tester y Davenport, 2003; Munns y Tester, 2008). Por otra parte, parámetros de crecimiento como acumulación de materia seca (Munns y Tester, 2008), macollaje (Ruan et al., 2008) y crecimiento de las hojas (Taleisnik et al., 1997; De Luca et al., 2001) han sido criterios utilizados para caracterizar poblaciones y para evaluar tolerancia a salinidad en gramíneas.

Para la rehabilitación de suelos salino- sódicos se requieren especies tolerantes a condiciones de salinidad, las cuales, mediante cambios morfológicos garanticen su supervivencia y producción satisfactoria en estos ambientes (Munns y Tester, 2008).

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la zona de estudio

La comarca lagunera se ubica entre los meridianos $101^{\circ} 41'$ y $104^{\circ} 61'$ de longitud oeste y los paralelos $24^{\circ} 59'$ y $26^{\circ} 53'$ de latitud norte. Cuenta con una extensión montañosa y una superficie plana donde se localiza el área agrícola, así como la zona urbana. La extensión territorial asciende a $47,887 \text{ Km}^2$ y está a $1,100 \text{ msnm}$. Su clima es seco desértico, con lluvia en verano e invierno fresco.

La investigación se realizó durante el ciclo primavera-verano del 2018, en el predio dentro del establo lechero denominado "La Gallega" localizado en el municipio de Gómez palacio, Durango, kilómetro veinticinco de la carretera Gómez Palacio – Jiménez.

Propiedades fisicoquímicas del agua de riego.

El agua con la que se riegan las parcelas está constituida por una mezcla de agua residual con agua de río lo cual genera el agua con la que se regaron las parcelas experimentales (Cuadro 2)

Cuadro 2. Propiedades fisicoquímicas del agua de riego.

Símbolo	Constituyente	Unidad	Agua residual	Agua de pozo	Mezcla (Agua de pozo + agua residual)
pH	pH		7.80	8.45	7.09
CE	Conductividad Eléctrica	ms / cm	7.10	0.219	4.17
Ca ²⁺	Calcio	meq / L	55.20	1.72	25.6
Mg ²⁺	Magnesio	meq / L	0.00	1.72	8.4
Na ⁺	Sodio	meq / L	18.61	0.11	7.7
CO ₃ ²⁻	Carbonatos	meq / L	0.00	0.8	2.5
HCO ₃ ⁻	Bicarbonatos	meq / L	9.40	9.5	15.2
Cl ⁻	Cloruros	meq / L	8.48	0.56	18.48
SO ₄ ²⁻	Sulfatos	ppm	284.35	4.65	160.4
NO ₃ ⁻	Nitratos	ppm	0.00	75.12	332.49
Pb	Plomo	ppm	0.4090	0.03	0.156
Cd	Cadmio	ppm	0.0536	0.05355	0.0364
As	Arsénico	ppm	0.20	0.2	0.05

Tratamientos.

Los tratamientos evaluados consistieron en la evaluación de tres tratamientos con cinco repeticiones. Los tratamientos fueron; diferentes tiempos de exposición del suelo a riego con agua residual.

Los tratamientos evaluados se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Tratamientos.

Tratamiento	Tipo de agua	Tiempo de exposición a riego con agua residual (Años)
1	Mezcla	10
2	Mezcla	3
3	Mezcla	1

Variables evaluadas

Las variables evaluadas en el agua residual y su método de determinación en el laboratorio se presentan en el cuadro 4.

Cuadro 4. Variables evaluadas en el agua.

Variable a evaluar	Abreviatura	Método de determinación
Potencial hidrogeno	pH	pH metro Orion 430 A
Conductividad eléctrica	CE	Conductivimetro 162 Orion
Calcio	Ca ²⁺	titulación con EDTA 0.01 N indicador Murexide
Magnesio	Mg ²⁺	mediante titulación con EDTA 0.01 N indicador Ericromo negro
Sodio	Na ⁺	método gravimétrico con calcinación
Carbonatos	CO ₃ ²⁻	Mediante titulación con Ácido sulfúrico 0.005 N indicador de fenolftaleína
Bicarbonatos	HCO ₃ ⁻	titulación con Ácido sulfúrico indicador anaranjado de metilo
Cloruros	Cl ⁻	titulación con nitrato de plata 0.005 N indicador Cromato de potasio
Sulfatos	SO ₄ ²⁻	Espectrofotómetro dual 420
Nitratos	NO ₃ ⁻	Espectrofotómetro dual 420
Plomo	Pb	Espectrofotómetro dual 420
Cadmio	Cd	Espectrofotómetro dual 420
Arsénico	As	prueba de arsénico de Hach

Muestreo de suelo

Se realizó un muestreo del suelo con barrena de caja utilizando los métodos que establece la NMX-AA-132-SCFI-2016 para el muestreo de suelo para la identificación, cuantificación de metales, metaloides, y manejo de la muestra.

Las muestras de suelo previamente recolectadas fueron secadas y tamizadas para su subsecuente análisis en el laboratorio de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro ubicada en la ciudad de Torreón, Coahuila.

Muestreo de agua

La muestra de agua residual se tomó del cárcamo donde se almacena el agua residual utilizada para el riego, cada muestra se sometió a análisis químicos donde se determinaron sus características físicas y químicas como son: pH, CE, MO, etc., así mismo, se realizaron las determinaciones de diversos metales pesados, entre ellos: As, Zn, Pb, etc.

Diseño experimental

El diseño experimental utilizado fue Bloques Completamente al Azar, con 3 tratamientos y 5 cinco repeticiones, generando 15 unidades experimentales. En cada tratamiento se realizó toma de muestras de suelo homogeneizada al igual que de agua.

Los resultados se sometieron a un análisis por medio del paquete estadístico statistical analysis system (SAS) versión 9.4.

RESULTADOS

Análisis de agua residual y cumplimiento de la norma oficial mexicana.

Los resultados del análisis de agua residual del establo comparado con los límites indicados en la 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 que se presenta en el Cuadro 5, indican que el agua residual no sobrepasa los límites máximos permisibles por las normas lo cual hace posible su utilización en la agricultura.

Cuadro 5. Análisis químico del agua residual del establo comparado con los límites indicados en la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Símbolo	Constituyente	Unidad	Establo	Límite Máximo Permissible
pH	pH		7.09	2000
CE	Conductividad Eléctrica	ms / cm	4.17	6.5 -8.5
Ca ²⁺	Calcio	meq / L	25.6	200
Mg ²⁺	Magnesio	meq / L	8.4	150
Na ⁺	Sodio	meq / L	7.7	200
CO ₃ ²⁻	Carbonatos	meq / L	2.5	
HCO ₃ ⁻	Bicarbonatos	meq / L	15.2	
Cl ⁻	Cloruros	meq / L	18.48	250
SO ₄ ²⁻	Sulfatos	ppm	160.4	
NO ₃ ⁻	Nitratos	ppm	332.49	60
Pb	Plomo	ppm	0.156	0.5
Cd	Cadmio	ppm	0.0364	0.4
As	Arsénico	ppm	0.05	0.4

Parámetros fisicoquímicos del suelo.

Los análisis de suelo y análisis estadísticos se presentan en el cuadro 6.

Cuadro 6. Parámetros fisicoquímicos del suelo.

Símbolo	Constituyente	Unidad	10 años de exposición	3 años de exposición	1 año de exposición
pH	pH		8.2 a	8.12 a	7.86 a
CE	Conductividad Eléctrica	ms / cm	3.38 a	1.75 b	0.71 c
Textura	% Arena - %Limo - %Arcilla		FAA	FA	FA
Mo	Materia Orgánica	meq / L	5.56 a	5.33 b	5.44a b
Ca + Mg	Calcio + Magnesio	meq / L	33.48 a	33.48 a	4.55 b
Ca ²⁺	Calcio	meq / L	25.30 a	6.96 b	3.94 b
Mg ²⁺	Magnesio	meq / L	7.00 a	4.32 ab	0.606 b
Na ⁺	Sodio	meq / L	7.61 a	7.78 a	2.61 a
CO ₃ ²⁻	Carbonatos	meq / L	1.7 a	1.28 ab	0.6 b
HCO ₃ ⁻	Bicarbonatos	meq / L	7.4 a	5.84 ab	4.6 b
Cl ⁻	Cloruros	meq / L	17.84 a	2.8 b	10.56 ab
RAS	Relación de absorción de sodio		1.86 a	1.91 a	1.78 a
PSI	Porcentaje de sodio intercambiable		1.66 a	1.53 a	1.34 a

FAA: Franco arcilloso arenoso, FA: Franco arcilloso.

pH

El análisis estadístico no presentó diferencia significativa ($p < 0,05$), para los tratamientos estudiados (Cuadro 6). El tratamiento que tendió a ser mayor fue el de 10 años de exposición con 8.2, esto debido a que existe un aumento muy bajo en los tratamientos de 1 año y 3 años de exposición.

El pH del suelo presenta valores alcalinos en base a la NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelo, estudio, muestreo y análisis.

Esto demuestra que el riego continuo con agua residual no genero un aumento en el pH los cuales coinciden con resultados obtenidos por Rusan *et al.*, (2007) que encontraron que el pH del suelo no presento cambios significativos ($p < 0,05$) con el uso continuo de agua residuales. Sin embargo no concuerdan con los datos obtenidos por Mace y Amrehein 2001 que encontraron que el uso de aguas residuales induce el incremento del pH.

CE

El análisis estadístico encontró diferencia significativa ($p < 0,05$) entre los diferentes tiempos de aplicación. La CE más se presenta en la aplicación con agua residual fue constante durante 10 años con 3.3 mS/cm^2 seguida de la de 3 años con 1.7 mS/cm^2 y por último la de 1 año con 0.7 mS/cm^2 (Cuadro 6). Lo que indica que existe un aumento en la conductividad eléctrica por efecto del riego con agua residual.

Lo cual concuerda con lo mencionado por Jahanting (2008) quien encontró que existe un aumento en la conductividad eléctrica luego de la aplicación de riego por tiempos de 3 a 5 años.

MO

En la Cuadro 6, se presenta el contenido de materia orgánica, encontrándose diferencia significativa entre los diferentes tiempos de aplicación de agua residual (1,3 y 10 años), se encontró que entre 3 año de aplicación con 5.33 % y el de 10 años de

aplicación con 5.56 %, existe una diferencia lo cual indicaría que existe un incremento de materia orgánica por efecto del riego continuo con agua residual.

El contenido de materia orgánica en el suelo tuvo un incremento por el uso continuo de agua residual, datos similares fueron encontrados por Nascimento *et al.*, (2004) quienes encontraron incrementos hasta de un 62 % de materia orgánica luego de la aplicación de aguas residuales en suelos de la zona semiárida Brasileña.

Calcio

Se encontró diferencia significativa entre el tiempo de aplicación de 1 año con 3.9 mg L⁻¹ de calcio, 10 años de aplicación con 25.3 mg L⁻¹ de calcio lo cual explica que conforme es más el tiempo de riego se incrementa la concentración de calcio en el suelo (Cuadro 6). Resultados obtenidos concuerdan con Ortiz (1997) el cual encontró que el agua en zonas áridas presenta grandes cantidades de Ca en solución las cuales generan que al utilizarlas incrementen el calcio en el suelo.

Magnesio

En esta variable se encontró diferencia significativa ($p < 0,05$) entre el tiempo de aplicación de 10 años con 7.02 mg L⁻¹ de magnesio y el de 1 año de aplicación con 0.606 mg L⁻¹ de magnesio (Cuadro 6) esto indica que el efecto de exposición de agua residual genera acumulación de este elemento en el suelo.

El riego constante con agua residual incrementa los niveles de magnesio en el suelo, respuestas similares se encontraron en investigaciones como las llanuras de Coro donde la aplicación constante de aguas residuales en suelos de las llanuras incrementa los niveles de magnesio con relación a los suelos bajo riego intermitente o en condición virgen (Zamora *et al.*, 2008).

Sodio

En la variable de sodio (Na) no se encontró diferencia estadística significativa entre los tres tratamientos (1, 3 y 10 años de exposición), por la acumulación de sodio por efecto de exposición de agua residual (Cuadro 6). Sin embargo se observa una tendencia de incremento hacia el tratamiento de 10 años de exposición y el menor en el de 1 año de exposición, esto se podría explicar cómo un aumento en la cantidad de sodio en el suelo.

El efecto de acumulación de sodio en el suelo es explicado por Bonet-Perez *et al.*, (2011) que mencionan que el riesgo de sodificación en los suelos, sobre todo en la capa superficial, se incrementa conforme se prolonga el periodo de años con riego de agua de pozo profundo con concentraciones medias (750-1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y altas (1500-3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) de Na^+ . Lo cual es aceptable ya que los contenidos de sodio en el agua residual con el cual se riegan las parcelas llegan a ser de medias a altas.

La aplicación de agua con elevada concentración de sodio al suelo disminuyen la fertilidad del mismo debido a la reducción de la aireación, aumento del pH y baja disponibilidad de hierro (Fe) y Zinc (Zn) (Castellanos y Ojo de agua, 2011).

Carbonatos

El análisis estadístico de los resultados (Cuadro 6) no encontró diferencia estadística significativa ($p < 0,05$) entre los tratamiento de 10 años de exposición con 1.7 mg L^{-1} de carbonatos en el suelo en comparación con el tratamiento de 3 años de exposición con 1.2 mg L^{-1} de carbonatos pero con una diferencia en 1 año de exposición con 0.6 mg L^{-1} de carbonatos, entre el tratamiento de 3 años de exposición no se encontró diferencias con el de 1 año.

Los altos contenidos de carbonatos en el agua generan una acumulación en el suelo generando grandes cantidades, en suelos salinos-sódicos los más importantes son $(\text{Na}_2\text{CO}_3)_2$, $(\text{CaCO}_3)_2$, $(\text{MgCO}_3)_2$, $(\text{K}_2\text{CO}_3)_2$, todo lo mencionado se encuentra en menor cantidad en los suelos salinos (Medina 1997).

Se menciona que en suelo con pH mayor a 8, 0 y alto nivel de carbonatos generan suelos sódicos (Andrades *et al.*, 2014).

Bicarbonatos

En el Cuadro 6 se presenta el contenido de bicarbonato en el suelo, se encontró una diferencia significativa entre el tratamiento de 10 años de exposición con 7.4 mg L^{-1} de bicarbonatos en el suelo en comparación con tratamiento de 1 año de exposición con 4.6 mg L^{-1} de bicarbonatos, entre el tratamiento de 3 años de aplicación no se encontró diferencia con el de 1 año de aplicación. Esto demuestra que existió una tendencia de aumento hacia el tiempo de 10 años de exposición lo cual indica que existe un incremento en el contenido de bicarbonatos por uso continuo con agua residual.

El constante riego con agua genera una acumulación de bicarbonatos lo que concuerda con Colacelli, 2000 que muestra la presencia de bicarbonatos de sodio en el agua, genera una acumulación en el suelo y un cambio en las propiedades físicas y químicas del suelo lo cual genera que sea inestable.

La precipitación del Ca en presencia de HCO_3 . Esta precipitación favorece la predominancia del sodio en el suelo, ya que al ser de baja solubilidad, permanece en el suelo después de que calcio y magnesio han precipitado (Can-Chulim *et al.*, 2008).

Cloruros

En el cuadro 6 se presenta el contenido de cloruros en el suelo en él se observa que existe diferencia significativa para los cloruros entre el tratamiento de 10 años con 17.84 mg L^{-1} que presento la mayor concentración seguido por el tratamiento de 1 año de exposición con 2.8 mg L^{-1} y finalmente por el tratamiento de 3 años con 10.56 mg L^{-1} , esto indica que aunque al principio el contenido de cloruros es alto con el paso del tiempo existe una disminución en el elemento aunque sigue aumentando después de 10 años, esto se debe a que el elemento es muy versátil.

El agua con concentraciones de cloruros entre 4 y 10 meq L^{-1} tienen restricción ligera a moderada y cuando las concentraciones son superiores a 10 meq L^{-1} poseen una severa restricción para riego por superficie (Ayers y Westcot, 1985). Esto indica que es riesgoso la utilización del agua de riego del experimento sin embargo por su utilización se observa que ha generado un aumento en la concentración de este elemento en el suelo.

Las sales derivadas reaccionan con alguna base, como el ácido clorhídrico, las cuales son más abundantes y más solubles, tóxicas para los cultivos, siendo los más importantes el cloruro de sodio (NaCl), cloruro de potasio (KCl), (CaCl), (MgCl), todos estos cloruros llegan a tener importancia en el ámbito local (Medina, 1997).

RAS

El análisis de varianza no encontró diferencia estadística significativa en los tratamientos (1, 3 y 10 años). En la relación de absorción de sodio por la exposición de agua residual (Cuadro 6). Sin embargo se observa una tendencia del incremento hacia el tratamiento de 1 año de exposición con 1.7 mg L^{-1} en la relación de absorción

de sodio en comparación con el tratamiento de 3 años y 1.9 mg L^{-1} , sin embargo volvió a bajar en un tiempo de exposición de 10 años lo cual indicaría que el elemento aunque se incrementa en un tiempo dado vuelve a los mismos valores después de más tiempo.

El agua de riego se clasifica de acuerdo con el peligro por sodio como sigue: bajo (de 0 a 10 RAS); medio (de 10 a 18 RAS); alto (de 18 a 24 RAS), y muy alto (> 24 RAS) En base a esto el agua con la cual se rego la parcela no cuenta con peligro por sodio ya que tiene un peligro bajo de peligro por sodicidad, esto indicaría porque no existió un aumento significativo en los tratamientos (Richards, 1973). Al igual que el sodio la relación de absorción de sodio se encuentra en niveles bajos.

PSI

El contenido de porcentaje de sodio intercambiable no presento diferencia significativa ($p < 0,05$) entre tratamientos (Cuadro 6). Esto podría interpretarse que igual que el sodio no se incrementó lo cual indica que aunque se aplique agua con mala calidad durante tiempos extensos no existe un efecto acumulativo del elemento en el suelo.

Una de las causas por las cuales no existió un aumento en el porcentaje de sodio intercambiable se podría explicar en el contenido de materia orgánica la cual genera que no exista un aumento en el contenido del suelo. Lo que concuerda con Jalali y Ranjbar 2009 que encontraron que la materia orgánica funciona como una enmienda orgánica la cual favorece la lixiviación de Na.

Resultados similares fueron encontrados por Tejada *et al.*, 2006 los cuales observaron una disminución constante y marcada del PSI a lo largo de cinco años de evaluación por la aplicación de materia orgánica, demostrando que con la aplicación

de agua continuo genero un aumento en el contenido de materia orgánica el cual funciono como un delimitante para el crecimiento del porcentaje de sodio intercambiable.

CONCLUSIÓN

El resultado del análisis de la muestra de agua residual cumple con los límites máximos permitidos en la norma oficial establecida en la NOM-001-ECOL-1996, lo cual indica que no existe problema alguno para la utilización de esta agua para riego agrícola.

Algunas de las propiedades fisicoquímicas del suelo (pH, Na, RAS y PSI) no fueron afectados por el riego continuo con agua residual durante 1, 3 y 10 años.

Solamente la CE, MO, CO_3^{2-} , HCO_3^- , Ca, Mg, Cl, fueron las variables que presentaron afectación por el riego con agua residual, al ser mayor el tiempo de riego con agua residual. Estas variables son indicadores de salinidad, lo cual podría generar un riesgo de salinidad en el suelo.

Recomendación

Se recomienda continuar con este tipo de estudios en los que se evalué un mayor periodo de irrigación sobre las propiedades físico químicas del suelo.

BIBLIOGRAFIA

- Amezketeta E. 2005. Vigilancia de la salinidad en suelos de Regadío mediante el Sensor Electromagnético, Departamento de Agricultura, Ganadería y Alimentación del Gobierno de Navarra, España.
- Andrades, Marisol, Ma. Elena Martínez. 2014, Fertilidad del suelo y parámetros que la definen. Tercera edición. Logroño, universidad de la rioja, Servicio de publicaciones, 2014. 29 p; v. digital. Material didáctico. Agricultura y alimentación; 03.
- Antonio S., R. 2015. Extracción de elementos minerales por la acelga regada con aguas residuales. Tesis. Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Coahuila, México. 45 p.
- Ayers, R S. y Westcott, D W. Calidad del agua en la agricultura, 174pp., FAO 29. Roma, Italia, 1987.
- Ayers R.S. y D.W. Westcott. 1985. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and drainage paper. 29, Rev. 1, FAO, Rome. 182 p.
- Bonet-Pérez C., Ricardo C. y Martha P. 2011. Calidad del agua de riego y su posible efecto en los rendimientos agrícolas en la Empresa de Cultivos Varios Sierra de Cubitas. Rev. Cie. Téc. Agr. 20, 19-23
- Brady, NC & RC Weil. 1999. Soils of dry regions: alkalinity, salinity and sodicity. En su: The Nature and Properties of Soils. Prentice Hall, New York, USA. pp 378- 403.p

- Can-Chulim, Á., Ramírez-Ayala, C., Ortega-Escobar, M., Trejo-López, C., & Cruz-Díaz, J. 2008. Evaluación de la relación de adsorción de sodio en las aguas del río Tulancingo, estado de Hidalgo, México. *Terra Latinoamericana*, 26(3), 243-252.
- Carabias, J. y Landa, R. 2005. Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México. Ed. UNAM/El Colegio de México/Fundación Gonzalo Río Arronte.
- Castellanos, J. Z. y J. L. Ojodeagua. 2011. Formulación de la solución nutritiva. En: Manual para la producción de tomate en invernadero. J. Z. Castellanos (Ed.). Intagri, S. C. Guanajuato, México. 131-156 pp.
- Castellanos, R. J. Z. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. Ed. Intagri. Gto., Mexico. 186 p.
- Cervantes y Ef., S., Ma, 2001 Lechería familiar: Factores de éxito para el negocio. 1ª ed. México: Plaza y Valdés editores; 88-99
- CESPT. 2007. Minuta de Trabajo. Estudio: estudio de factibilidad para el reusó de aguas tratadas dentro de la zona urbana de Tijuana, Baja California. Fecha: 2 de mayo de 2007. Lugar de reunión: Oficinas de la sede de la Asociación Ganadera de Tijuana. Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana. Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza. 7 pp.
- Chauvet, M. 2001. Los nuevos retos de la ganadería. En: Historia ambiental de la ganadería en México. Editado por: Lucina Hernández. L'Institut de Reserche pour le Developpement, Francia. Instituto de Ecología. México, Veracruz. 276 pp.
- Chhabra, R. 1996. Soil Salinity and Water Quality. Rotterdam, A.A. Balkema Publishers. 283p.

- Chinnusamy, Viswanathan; Jagendorf, André; Zhu, Jian-Kang. 2005. Understanding and improving salt tolerance in plants. *Crop Science*. 45: 437-448.
- Colacelli, M. 2000. *Uso del suelo*. Editorial de la facultad de Agronomía y Zootecnia. U.N.T. Pp. 1– 24.
- Comisión Nacional del Agua. 2013. *Estadísticas del agua en México. Edición 2013*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua. Tlalpan, Ciudad de México, México, 176 pp.
- Comisión Nacional del Agua. 2003. *Consolidación y desarrollo del distrito de riego 017, Comarca Lagunera*. Gerencia regional de las cuencas centrales del norte. Torreón, Coah. México 56 p.
- Comisión Nacional de Agua. 2017. *Estadísticas del agua en México*. SEMARNAT. México.
- Comisión Nacional del Agua. 2012, “Situación del Subsector de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento”, Edición 2012. Sector de Infraestructura y Medio ambiente. Nota Técnica # IDB-TN-521.
- Comisión Nacional del Agua. 2010. *Atlas digital del agua México 2010. Contraste regional entre el desarrollo y la disponibilidad del agua, 2008* [en línea] <http://www.conagua.gob.mx/atlas/> 15/08/2019
- De Luca M, García Seffino L, Grunberg K, Salgado M, Cordoba A., Luna C, Ortega L, Rodríguez A, Castagnaro A, Taleisnik E. 2001. Physiological causes for decreased productivity under high salinity in Boma, a tetraploid *Chloris gayana* cultivar. *Aust. J. Agr. Res.* 52: 903–910.

- Dorronso, C. 2001. Degradación del suelo. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Universidad de Granada, España.
- Hanson, B. 1993. Agricultural Salinity and Drainage. University Of California Irrigations Programs, University of California. 141 p.
- Havlin, J. L.; Nelson, W. ., Beaton, J. D. 2013. Soil Fertility and Fertilizers an Introduction to Nutrient Management. Ed. Pearson. EE. UU. 516 p.
- Jahanting, M. 2008. Impact of Recycled Wastewater Irrigation on Soil Chemical Properties in an Arid Region. Pakistan.Journal of BiologicalSciences, 11 (18), 2264-2268.
- Jalali, M. and Ranjbar, F. 2009. "Effects of sodic water on soil sodicity and nutrient leaching in poultry and sheep manure amended soils". *Geoderma*, Vol. 153 No. 1-2 (pp.194-204).
- Leff, E. 1990. Medio ambiente y desarrollo en México. México. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Humanidades. Miguel Ángel Porrúa. 356 pp.
- Maas EV, Lesch SM, Francois LE, Grieve CM. 1994. Tiller development in saltstressed wheat. *Crop Sci.*34: 1594–1603.
- Mace, J. E., and C. Amrhein. 2001. Leaching and reclamation of a soil irrigated with moderate SAR waters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 199-204. Mace, J. E., and C. Amrhein. 2001. Leaching and reclamation of a soil irrigated with moderate SAR waters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 199-204.

- Maqueda, A. P. 2003. Fitoremediación de suelos contaminados con metales pesados. Tesis de Opción a Maestría en Biotecnología. Departamento de Química y Biología, Universidad de las Américas, Cholula, Puebla. México.
- Martinez-Almela J., Bernal R. F., Martínez G. C. Barrera M. J. Bartomeu O. y Martínez A. V. 1990. Convirtiendo los residuos animales en productos de valor añadido y energía. Servicios avanzados de ingeniería SELCO, ES. www.seco.net.
- Mau, Y. & Porporato, A. 2015. A dynamical system approach to soil salinity and sodicity. *Advances in Water Resources*. 83: 68-76.
- Medina. J. 1997. El suelo, abono y fertilización de los cultivos. 4ta Ed. Ed. Mundi Prensa. Pp. 167-181.
- Méndez-García T., Rodríguez-Domínguez L. y Palacios-Mayorga S. 2000. Impacto del riego con aguas contaminadas, evaluado a través de la presencia de metales pesados en suelos. *TERRA*, 18 (4): 277–288.
- Misas Restrepo, M. L. 1998. Calidad de agua en los hatos lecheros de Colombia. Trabajo presentado en el Seminario Internacional Calidad de Agua en predios lecheros y su impacto en la cadena agroindustrial. FEPALE INIA Universidad de la Republica, Montevideo.
- Monforte Garcia Gabriela y Pedro Cesar Cantú Martínez, Escenario del agua en Mexico CULCyT. 2009. Año 6, No 30, Pag. 31 – 40
- Moreno, J. M. D. y M. Moral. 1996. Análisis y calidad del agua para el riego: Editorial Servicios de publicaciones Universidad Politécnica de Valencia, España, 1996.

- Munns R, Tester M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*. 59: 651-681.
- Munns, Rana; Goyal, Sham S.; Passioura, John. 2005. Salinity stress and its mitigation. University of California, Davis. 19 p.
- Nascimento, C., A. Barros, D. Melo y A. Oliveira. 2004, Alteracoes químicas em solos e crecimiento de milho e feijoeiro apos aplicacao de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciencia de Solo* 28(2): 385-392.
- National Academy of Science. 1974. Nutrients and Toxic Substances in water for livestock and poultry. Washington DC, USA, National Academy Press.
- Nebel, J.F., Wright, L.F. and Schmidt. L. 1999. Metals determination in milk powder samples for adult and infant nutrition after focused-microwave induced combustion. *Microchemical Journal*, 2(2), p. 29–35.
- Nedelkoska, T. V; Doran, P. M. 2000. Characteristics of heavy metal uptake by plant species with potential for phytoremediation and phytomining. *Minerals engineer*. 13(5):549 – 561.
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. *Diario Oficial de la Federación*. México, D.F.
- Norma Oficial Mexicana NOM-O21-SEMARNAT-2000. 2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis (85 pp.). México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Norma Oficial Mexicana NMX-AA-132-SCFI-(2006). Muestreo de Suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra. Diario Oficial de la Federación.

Obregón, D. 2005. Calidad del agua y mantenimiento de acuarios. Revista Electrónica de veterinaria REDVET vol. VI: pág. 3.

OCDE 2004. Principios de gobierno corporativo. México.

Ortega, F y R. Orellana. 2007. "El riego con agua de mala calidad en la agricultura urbana. Aspectos a considerar II. Aguas residuales urbanas" *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(3): 25-27.

Ortiz, O. M. 1997. La calidad de las aguas de riego. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 53 p.

Peinemann N. 1998. Suelos salinos y sódicos: Notas para el curso. Dpto. de Agronomía. UNS. 258 pp.

Pérez D., J.L. 2012. Estado actual del tratamiento de agua Residual en el estable Lechero el porvenir. Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Unidad laguna, Torreón, Coahuila. México. 45 p.

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

Pérez, Y; y G. Hernández. 2007. "Valoración de la calidad del agua del Arroyo Guachinango, con fines de riego", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(3): 6-8,

- Pessarakli, M. 1994. Handbook of plant and crop stress. University of Arizona. Tucson. Arizona. 697.
- Prieto-Méndez J., González-Ramírez C. A., Román- Gutiérrez A. D., Prieto-García F. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 10, 29-44.
- Ramos-Leal, J. A., B. López-Álvarez, G. Santacruz-De León, O. Almanza-Tovar, J. Morán-Ramírez, D. A. Padilla- Reyes, and Z. I. González-Acevedo. 2016. Quality indices of groundwater for agricultural use in the region of Tierra Nueva, San Luis Potosi, Mexico. *Arab. J. Geosci.* 9: 736.
- Rascón A. E., Peña C. E., López C. R., Cantú S. M. y Narro F. E. A. 2005. Impacto en algunas propiedades físicas del suelo por aplicación de aguas residuales. *TERRA Latinoamericana*, 26 (1): 69-74.
- Richards, L. A. Ed. 1982. Diagnóstico y rehabilitación de los suelos salinos y sódicos. US Salinity Laboratory. Ed Limusa. México.
- Richards, L. A. 1973. *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos* (172 pp.). Manual 60. México, DF: Limusa.
- Romero, M.P.; Santamaría, D.M. & Zafra, C.A. 2009. Bioengineering and soil: microbiological abundance, pH and electrical conductivity under three strates of erosion. *Umbral Científico* (15), 67-74.
- Romero, J.A. 2000. Tratamiento de Aguas Residuales, Escuela Colombiana de Ingeniería,

- Ruan Y, Hu Y, Schmidhalter U. 2008. Insights on the role of tillering in salt tolerance of spring wheat from detillering. *Environ. Exp. Bot.* 64: 33-42.
- Rusan, M; Hinnawi, S; Rousan, L. 2007. Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. *Desalination*, 215, 143- 152.
- Sánchez M., Guerra D. L., Scherger M. 2015. Evaluación de las áreas bajo riego afectadas por salinidad y/o sodicidad en argentina. INTA.
- Sauve, M., R. Allen, W. 2000. Heavy metals contamination characteristics in soil of different mining activity zones. *Science press* 18: 207-2011.
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2005. Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua. Disponible: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx/informacionambiental/Publicacion/Gestion_Ambiental.pdf. Consultado: 18/08/19
- Seroa De Motta, R., Contreras, H. Y Saade, L. 2000. Wastewater effluent charge in Mexico. En: Instrumentos de Mercado para la política Ambiental en America Latina y el Caribe.
- SIAP, 2009. Servicio de información Agroalimentaria y pesquera (SIAP). Anuarios estadísticos de la producción agropecuaria. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. SAGARPA-SIAP.
- SIAP. 2010. Servicio de información Agroalimentaria y pesquera (SIAP). Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Datos oficiales. Disponibles en el portal electrónico del SIAP.

- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2015. Estadística de producción pecuaria: Región Lagunera. Recuperado el 20 de mayo de 2009 de <http://www.siap.gob.mx/ganaderia/>.
- Sukias, J. and Tanner. 2005. Ponds for livestock wastes. In: Pond treatment technology. Chapter 19. IWA Publishing. (A. Shilton ed). International water association. pp
- Talarico, C., H.Mazzei y R. Klix. 2007. "Características del líquido cloacal físicas, químicas y biológicas." pág. 13.
- Taleisnik E, Grunberg K, Santa María G. 2008. La salinización de suelos en la argentina: Su impacto en la producción agropecuaria. Editorial Universitaria de Córdoba, Córdoba. 118 p.
- Taleisnik E, Peyrano G, Arias C. 1997. Response of *Chloris gayana* cultivars to salinity. 1. Germination and early vegetative growth. *Tropical Grasslands* 31: 232-240.
- Tamariz F, J.V. 1996. Contaminación de suelos agrícolas por metales pesados en el municipio de Atlixco, Puebla. Tesis de Maestría en Edafología. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Tejada, M., García, C., González, J. L., and Hernández, M. T. 2006. Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: influence on the physical, chemical and biological properties of soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 38 (6): 1413-1421.
- Tester M, Davenport R. 2003. Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants. *Ann. Bot.* 91: 503-527.

- Toledo, Alejandro. 2002. El agua en México y el mundo Gaceta Ecológica, núm. 64, julio-septiembre, pp. 9-18. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Distrito Federal, México
- U.S. Salinity Laboratory. 1954. Precipitation and solution of calcium carbonate in irrigation operations. Soil Sci. Society proceedings, p. 93-94.
- Vázquez G., L.B. 2010. Situación del tratamiento de aguas residuales en los establos lecheros de Tijuana y los factores limitantes en su tecnificación. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Unidad laguna, Torreón, Coahuila. México. 98 p.
- Velázquez M.M., Ortega E.M., Martínez G.A., Kohashi S.J. y García C.N. 2002. Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del Valle de Mezquital, Hidalgo, México. Terra Latinoamérica. 20, 459-464.
- Villafañe R., Hernández R. y Sánchez N. 2002. Impacto del riego con aguas servidas en los suelos de la cuenca de Valencia. Agronomía tropical 52, 89-108.
- Vitoria, H., & Natera, J.R.M. 2007. Relación de la calidad fisiológica de semillas de maíz con pH y conductividad eléctrica. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. 39 (2): 91-100.
- Winkler M. A. 1999. Tratamiento biológico de aguas de desecho. Ed. Limusa.
- Zamora, F. Rodríguez, N. Torrez, D. Yendis, H. 2008. Efecto del Riego con Aguas Residuales Sobre las Propiedades Químicas del Suelo de la Planicie de Coro, Estado Falcón. Bioagro. 20(3): 193-199.