



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**FACTIBILIDAD DEL EMPLEO DE UNA LÁMINA DE RIEGO
MENOR EN EL VALLE DE TULA PARA DISMINUIR LA
AFECTACIÓN DEL SUELO Y LA CONTAMINACIÓN DEL
ACUÍFERO**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL-SUELO-AGUAS SUBTERRÁNEAS

P R E S E N T A :

IBT. KARLA MARIA RODAS ZAVALA

TUTORA:

DRA. BLANCA ELENA JIMÉNEZ CISNEROS



2008

CON AMOR DEDICO MI TESIS

A mis padres Maria Xochitl Zavala y Jorge Rodas Cisneros, por continuar apoyándome en este nuevo reto, por su amor, sus cuidados y sus preocupaciones, por estar siempre conmigo, por pensar en mí y darme la fuerza necesaria para no rendirme nunca. Gracias mamá por cada una de tus oraciones dedicadas a mí con tanto amor. Gracias Papá por la fuerza con la que me educaste y que hoy me abre muchas puertas. Los amo con todo mi corazón.

A mi hermano Jorge, por todo tu cariño y apoyo en la realización de la maestría. Gracias por estar conmigo en todo momento. Estoy muy orgullosa de ti y te quiero mucho.

A mi hermana Xochitl, de manera muy especial, porque sin tu apoyo esto no sería una realidad, gracias por confiar en mi sueño y ayudarme a cumplirlo, gracias por preocuparte por mi bienestar en todos los aspectos, Te quiero mucho. Gracias también a Jorge, mi cuñado, por haberme comprado mis útiles escolares para el inicio de la maestría, fue un gesto muy lindo.

A mi hermana Angélica, una niña muy inteligente y muy bonita por todos los mensajitos que me has mandado cada noche con el simple propósito de saber como estoy y recordarme cuanto me quieren, por todas las locuras que se nos ocurren y nos hacen reír tanto. Te quiero mucho.

A Javier, por dejarme crecer sin ataduras, por tu comprensión, tú apoyo en todo momento, tu esfuerzo y tantísimo amor, para que a pesar de la distancia continuemos juntos como el primer día: con todas las ganas. Te quiero muchísimo.

A mi tía Yolanda, por todo tu cariño, por preocuparte por mí y por las lágrimas que te he robado en cada despedida. Pronto seré rica lo prometo.

A Paco, por todo tu apoyo en el desarrollo de mi experimento, por las desveladas para ir a los muestreos y por cuidarme y procurar siempre mi bienestar, muchas gracias.

A mi amiga Paty, por tu amistad, compañía, paciencia, apoyo y por lo divertido que ha sido vivir contigo. Te admiro amiga, eres un ejemplo de fortaleza y valentía.

A mis mejores amigos Paulina y Andrés Aguilar, por lo agradable que ha sido convivir este tiempo con ustedes, por todos sus consejos, las comidas, películas, fiestas y momentos especiales que hemos compartido. Los quiero mucho y sobre todo los admiro.

A mi amiga Mónica y sus papas, por todo el apoyo que me dieron en los días de muestreo y otras situaciones difíciles. Con agradecimiento y cariño.

A mi amiga Vanessa, compañera de la maestría, por tu apoyo, las pláticas agradables que tuvimos y tú amistad.

A mis amigos y compañeros de la maestría: Christopher, Rodrigo, Abril, Dafne, Paco por su amistad, sus enseñanzas y por permitirme trabajar con ustedes.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y el Instituto de Ingeniería por darme la oportunidad de continuar creciendo en sus instalaciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada que hizo posible mi estancia y dedicación completa en esta maestría.

A la Dra. Blanca Jiménez, que me permitió trabajar bajo su dirección, por su apoyo y enseñanza. Con admiración y respeto, muchas gracias.

A los miembros de mi jurado Dra. Cristina Siebe Grabach, M. en I. Ana Elisa Silva Martínez, Dr. Victor Manuel Luna Pabello y Dra. Rosario Iturbe Argüelles por sus valiosas aportaciones a mi trabajo de tesis.

A los integrantes del grupo tratamiento y reúso, Dra. Alma Chavéz Mejía, M. en I. Elias Becerril Bravo, Dr. José Antonio Barrios Pérez y M. en C. Catalina Maya Rendón, por su apoyo y comentarios siempre valiosos a mi trabajo.

A mis amigos del grupo tratamiento y reúso y otros grupos de trabajo, Andrés, Paulina, Vanessa, Jesús, Juan Carlos, Oriana, Sergio, Tania, Laura, Juan Antonio, Anemir, Karina, Erika, Diana, Vanesa, Xochilt, Rubén, Judith, Vicky, Rosario, Carolina, Saíd, Miriam e Iván por hacer mi estancia mas amena con su compañía.

A mi amigo Rubén Bernard del Instituto de Geofísica de la UNAM, por todo tu apoyo para el análisis de mis muestras, pero principalmente por tu amistad y los buenos momentos que pasamos juntos.

Al M. en C. Manuel Rincón Rabanales por su apoyo en el análisis estadístico y su amistad. Con admiración y respeto.

AL INSTITUTO DE GEOLOGÍA, ESPECIALMENTE A:

A la Dra. Cristina Siebe Grabach, integrante de mi comité tutorial por el entusiasmo puesto en mi tema de tesis y la confianza que me brindo al abrirme las puertas del grupo de trabajo de Edafología Ambiental que ella dirige. Así mismo por sus observaciones y aportaciones siempre valiosas para enriquecer mi proyecto. Con Admiración y respeto: Muchas Gracias

A la Dra. Lucy Mora, responsable del laboratorio de Edafología Ambiental por todo su apoyo en el desarrollo de la metodología y en la obtención de resultados. Por sus consejos siempre sabios y

prácticos. Al mismo tiempo gracias a Emiliano, un bebe hermoso por ser comprensivo con su mami y permitírnos trabajar hasta el final.

A la M. en C Mónica Rangel, responsable del invernadero del Instituto de Geología por su apoyo y preocupación para que todo marchara bien en el desarrollo de mí experimento.

A la M. en C. Kumiko Shimada, don Roberto, Lucero y Samuel por su apoyo en la realización de algunos análisis de laboratorio y por su amistad.

A mis compañeros del instituto de geología: Soledad, Lorely, Blanca y Pedro por su apoyo y amistad.

Y.... a todas las personas cuya presencia fue importante para mantenerme en un estado emocional adecuado y que han colaborado de distintas maneras en la realización de esta tesis, con todo mi cariño y agradecimiento

“MIL GRACIAS”

ÍNDICE

RESUMEN	8
INTRODUCCIÓN	10
OBJETIVO GENERAL	13
METAS	13
HIPÓTESIS	13
ALCANCES	14
CAPÍTULO 1 Fundamentos teóricos	15
1.1 Reúso de aguas residuales para riego agrícola	15
1.2 Ventajas del empleo de aguas residuales en riego agrícola	16
1.2.1 Nutrientes	16
1.2.1.1 Nitrógeno	16
1.2.1.2 Fósforo	17
1.2.1.3 Materia orgánica	17
1.2.2 Recarga de acuíferos	18
1.2.3 Remoción de nitrógeno	19
1.2.4 Remoción de fósforo	19
1.2.5 Remoción de materia orgánica	19
1.3 Desventajas del empleo de aguas residuales para riego agrícola	20
1.3.1 Contaminación de aguas subterráneas y superficiales	20
1.3.1.1 Contaminación de aguas subterráneas por nitratos	20
1.3.1.2 Contaminación de aguas subterráneas por Fósforo	21
1.3.1.3 Contaminación de aguas subterráneas por sales	21
1.4 Desventajas de la recarga de acuíferos con aguas residuales	22
1.4.1 Contaminación de aguas superficiales	22
1.4.2 Afectación por sales al suelo debida a la irrigación	23
1.5 Proyectos de irrigación	24
1.5.1 Calidad del agua de riego	24
1.5.2 Determinación del requerimiento de riego	24
1.5.2.1 Estimación de la evapotranspiración	25
1.5.3 Riegos y lavados con relación al control de la salinidad	26
1.5.3.1 Necesidades de lavado	26
CAPÍTULO 2 Descripción de la problemática	27
2.1 La agricultura en el Valle de Tula	27
2.1.1 Descripción general	27
2.1.2 Ubicación	27
2.1.3 Condiciones climáticas	28
2.2 Prácticas agrícolas	28
2.3 Calidad del agua residual empleada para el riego	29
2.3.1 Modificación de la calidad del agua residual	30
2.4 Efectos por el empleo de aguas residuales	31
2.4.1 Efecto sobre las propiedades del suelo y los cultivos	31
2.4.1.1 Nutrientes	31

Nitrógeno.....	31
Fósforo.....	32
Materia orgánica	33
Afectación por sales	33
2.4.2 Recarga del acuífero.....	33
2.4.2.1 Evolución de la calidad del agua subterránea.....	34
CAPÍTULO 3 Metodología	35
3.1 Muestreo, recolección y caracterización del suelo	35
3.1.1 selección y ubicación del sitio de muestreo	35
3.1.2 Recolección del suelo	36
3.1.3 Caracterización fisicoquímica del suelo	37
3.2 Descripción del montaje experimental en invernadero	38
3.2.1 Características de las columnas.....	38
3.2.2 Características del sistema de extracción de lixiviados.....	39
3.2.3 Diseño experimental.....	39
3.3 Muestreo y caracterización de las aguas residuales.....	40
3.3.1 Caracterización de las aguas residuales	42
3.4 Aplicación de láminas de riego y análisis de lixiviados.....	43
3.4.1 Cálculo de la lámina de riego.....	43
3.4.1.1 Determinación de la evapotranspiración (EVT)	43
3.5 Determinación de las necesidades de lavado.....	44
3.6 Análisis de lixiviados.....	45
3.7 Características de la semilla de alfalfa empleada	45
3.7.1 Determinación del desarrollo vegetativo de la alfalfa.	45
3.7.2 Determinación de macro y micronutrientes en tejidos de alfalfa.	46
3.8 Caracterización final del suelo	46
3.9 Análisis estadístico de los datos.....	47
CAPITULO 4 Resultados y discusión.....	48
4.1 Caracterización inicial del suelo	48
4.2 Caracterización del agua residual.....	49
4.3 Análisis de lixiviados.....	50
4.3.1 Materia orgánica.....	50
4.3.1.1 Aporte de materia orgánica por los lixiviados	51
4.3.2 Remoción de la DQO soluble	52
4.3.1.1 Aporte de materia orgánica por los lixiviados	53
4.4 Comportamiento de la Conductividad Eléctrica	54
4.5 Remoción de sales por el suelo	55
4.5.1 Comportamiento de los iones	56
4.5.1.1 Aporte de sales.	57
4.7 Parámetros vegetativos de la Alfalfa	59
4.7.1 Peso fresco del tejido de alfalfa	59
4.7.2 Peso seco del tejido de alfalfa	61
4.8 Relación entre el peso fresco y seco del tejido de alfalfa.	62
4.9 Elementos mayores y traza en tejido de alfalfa.....	63
4.9.1 Elementos mayores	63

4.9.1.1 Nitrógeno	64
4.9.1.2 Fósforo	65
4.9.1.3 Potasio	66
4.9.1.4 Azufre	67
4.9.1.5 Calcio	67
4.9.1.6 Magnesio	68
4.9.2 Relación N:S.....	68
4.10 Sodio.....	69
4.11 Micronutrientes.....	69
4.11.1 Cobre	70
4.11.2 Hierro, manganeso y zinc	71
4.12 Variación en los contenidos de nutrientes, materia orgánica y sales del suelo	72
4.13 Caracterización fisicoquímica del suelo al final del experimento	73
4.13.1 Nitrógeno total.....	73
4.13.2 Fósforo disponible	74
4.13.3 Materia orgánica.....	75
4.13.4 Importancia de la relación C/N en el suelo.....	77
4.13.5 Conductividad eléctrica	77
4.14 Concentración de los principales iones en suelo.....	78
4.14.1 Cationes.....	79
4.14.1.1 Sodio	80
4.14.1.2 Potasio	81
4.14.1.3 Calcio y magnesio	82
4.14.1.4 Relación de absorción de sodio (RAS)	82
4.14.2 Aniones	82
4.14.2.1 Cloruros.....	83
4.15 Aporte de nutrientes	84
4.15.1 Balance de nitrógeno en el sistema	84
4.15.1.1 Entradas	84
4.15.1.2 Salidas.....	84
4.15.2 Balance de masas del fósforo.	88
4.15.2.1 Entradas	88
4.15.2.2 Salidas.....	88
CAPÍTULO 5 Conclusiones y recomendaciones	92
Bibliografía.....	95
Anexos	101

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 3.1 Ubicación del sitio de muestreo y recolección del suelo.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.2 Recolección del suelo a) presentación de las columnas en el surco, b) hincado de las columnas en el suelo y c) extracción de las columnas empacadas de suelo</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.3 Componentes de las columnas a) columna y b) base de polímero de alta densidad sobre la cual se colocaron las columnas. ...</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3.4 Sistema de extracción de lixiviados a) recuperación de lixiviados y b) línea de succión forzada.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.5 Diseño experimental empleado para simular las condiciones de riego en el Valle de Tula, la extracción de lixiviados y la distribución de los tratamientos.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 3.6 Sitios de muestreo del agua residual a) canal de riego del Rancho “Chelita” en Atitalaquia, Hgo. y b) canal de riego Endhó en el Rosario, Hgo.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4.1 Concentración de DQO total en los lixiviados, con respecto a la DQO total de entrada del agua residual a lo largo de los riegos para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4.2 DQO total (mg) aportada por los lixiviados para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.3 Concentración de DQO soluble en los lixiviados, con respecto a la DQO soluble aportada por el agua residual a lo largo de los riegos para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4.4 Cantidad total de materia orgánica, medida como DQO soluble aportada por los lixiviados para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego a lo largo de los riegos.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4.5 Conductividad eléctrica (mS/cm) de los lixiviados a lo largo de los riegos para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4.6 Concentración promedio obtenida a lo largo de los riegos de los iones analizados para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4.7 Cantidad de sales (mg) aportada por los lixiviados para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4.8 Peso fresco del tejido de alfalfa para cada tratamiento y calidad del agua residual</i>	<i>60</i>
<i>Figura 4.9 Peso seco del tejido de alfalfa para cada tratamiento y calidad del agua residual</i>	<i>61</i>

Figura 4.10 Contenido de nitrógeno en por ciento en el tejido de alfalfa para cada tratamiento y calidad del agua residual.....	64
Figura 4.11 Contenido de fósforo g/kg en el tejido de alfalfa para cada tratamiento y calidad del agua residual.	65
Figura 4.12 Contenido de potasio en mg/kg en el tejido de alfalfa para cada tratamiento y calidad del agua residual.	66
Figura 4.13 Contenido de azufre en mg/kg en el tejido de alfalfa para cada tratamiento y calidad del agua residual.	67
Figura 4.14 Contenido de cobre en mg/kg en el tejido de alfalfa para cada tratamiento y calidad del agua residual.	70
Figura 4.15 Contenido de fósforo disponible en mg/kg en el suelo para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.....	74
Figura 4.16 Variación en la conductividad eléctrica en la solución del suelo, al final del experimento para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.	78
Figura 4.17 Concentración en meq/kg de los cationes analizados para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.....	79
Figura 4.18 Concentración de sodio en meq/kg para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego	80
Figura 4.19 Concentración de potasio en meq/kg para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego	81
Figura 4.20 Contenido de cloruros en meq/kg en el suelo para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.....	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Relación de cultivos por emprender. Distrito de Riego 003: Tula, Hidalgo. Año agrícola 2005-2006.....	29
Tabla 3.1 Parámetros y métodos empleados para caracterizar el suelo.....	37
Tabla 3.2 Comparación de la calidad del efluente de un sistema de Tratamiento Primario Avanzado TPA (Adaptado de Jiménez y Chavéz, 2004) y el agua del Canal Endhó.....	41
Tabla 3.3. Parámetros y métodos para caracterizar las aguas residuales.	42
Tabla 3.4. Tratamientos empleados	45
Tabla 3.5 Parámetros adicionales de caracterización del suelo al final del experimento.....	46
Tabla 4.1 Caracterización fisicoquímica del suelo al inicio del experimento, con respecto a lo reportado en la literatura	48
Tabla 4.2 Caracterización de los dos tipos de agua residual empleada ARC: Agua Residual Cruda y ARP: Agua Residual Parcialmente tratada.	49
Tabla 4.3 Concentración promedio en mg/L de iones en los lixiviados obtenidos por las tres láminas de riego con respecto a la concentración encontrada en los dos tipos de agua residual.....	56
Tabla 4.4 Valores promedio de elementos mayores y traza medidos en tejido de alfalfa, para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego, en comparación con lo reportado en la literatura.....	63
Tabla 4.5 Caracterización fisicoquímica del suelo al final del experimento para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.	73
Tabla 4.6 Concentración (meq/kg) de los principales iones en suelo, al final del experimento para cada tratamiento y calidad del agua residual	79
Tabla 4.7 Contenido de nitrógeno en el tejido de alfalfa para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.....	85
Tabla 4.8 Peso seco en gramos del tejido de alfalfa para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.	85
Tabla 4.9 Balance de nitrógeno en el sistema de estudio, para el agua residual cruda (ARC) y las tres láminas de riego Lámina Aplicada (LA), Lámina Media (LM) y Lámina Calculada (LC).....	85
Tabla 4.10 Balance de nitrógeno en el sistema de estudio, para el Agua Residual Parcialmente tratada (ARP) y las tres láminas de riego Lámina Aplicada (LA), Lámina Media (LM) y Lámina Calculada (LC).....	86

Tabla 4.11	Contenidos de fósforo en los tejidos de alfalfa para las tres láminas de riego y las dos calidades de agua residual.	88
Tabla 4.12	Peso seco (g) obtenido al final del experimento para las tres láminas de riego y las dos calidades de agua residual.	89
Tabla 4.13	Balance de fósforo en el sistema de estudio, para el agua residual cruda (ARC) y las tres láminas de riego Lámina Aplicada (LA), Lámina Media (LM) y Lámina Calculada (LC).....	89
Tabla 4.14	Balance de fósforo en el sistema de estudio, para el Agua Residual Parcialmente tratada (ARP) y las tres láminas de riego Lámina Aplicada (LA), Lámina Media (LM) y Lámina Calculada (LC).....	89

RESUMEN

El empleo de aguas residuales crudas para el riego agrícola en el Valle de Tula, Hidalgo ha traído como consecuencia una recarga indirecta del acuífero, con lo cual han surgido manantiales que constituyen hoy en día la única fuente de abastecimiento del Valle. Debido a la aplicación de elevadas láminas de riego, un exceso de nutrientes y sales que no se alcanza a absorber por los cultivos contamina el acuífero principalmente por nitratos y cloruros. También existe evidencia de la presencia de fósforo dado la proliferación de algas en cuerpos de aguas superficiales. Respecto a la calidad del suelo, se ha observado la afectación por sales en algunos sitios y hoy en día el sodio es el catión más abundante. Las opciones para mejorar el empleo de aguas residuales en el Valle de Tula, incluyen entre otras, el empleo de técnicas más eficientes de irrigación y el tratamiento de las aguas residuales. Esta última ha sido estudiada ampliamente, no obstante, los agricultores de la zona consideran que el empleo de agua residual tratada traerá como consecuencia una disminución en la productividad de los cultivos.

Por lo anterior, en la presente tesis se evaluó el efecto de disminuir la lámina de riego empleando tanto aguas residuales crudas como parcialmente tratadas, sobre el contenido de nutrientes (nitrógeno y fósforo), materia orgánica y sales que lixivian al acuífero, la productividad y calidad del cultivo de alfalfa y finalmente, la reserva de nutrientes (nitrógeno y fósforo disponible) y materia orgánica en el suelo, así como el lavado de las sales del mismo. Las láminas de riego consideradas fueron la actualmente aplicada en el Valle, la calculada con base en la evapotranspiración del cultivo y el lavado de sales de los suelos y una lámina intermedia entre estos dos valores.

Los resultados obtenidos del aporte de nutrientes, mostraron que en los dos tipos de agua residual se observó una importante lixiviación de nitratos y fosfatos. Sin embargo, dicha lixiviación fue mayor cuando se empleó agua residual parcialmente tratada. La disminución de las láminas de riego redujo considerablemente la cantidad de nitratos y fosfatos lixiviados. Con respecto al contenido de materia orgánica en los lixiviados, cuando se empleó agua residual parcialmente tratada dicho contenido fue de la mitad, respecto de cuando se usó agua residual cruda. De igual manera que para los nutrientes, el contenido de materia orgánica en los lixiviados disminuyó conforme se redujeron las

láminas de riego. Para las sales, no se observó una reducción importante al comparar entre los dos tipos de agua residual, pero sí cuando se disminuyeron las láminas de riego. Para todos los casos anteriormente señalados, la lámina calculada fue la mejor en términos de un menor aporte de nutrientes, materia orgánica y sales. Dicha lámina representa una reducción, en promedio, del 45% de la lámina actualmente empleada.

Los resultados obtenidos de la productividad de la alfalfa, demostraron que ésta se mantiene en niveles similares tanto con el empleo de agua residual cruda como con agua residual parcialmente tratada. De igual manera, no se observó un efecto importante al emplear láminas de riego menores a la actualmente empleada. En cuanto a la calidad del cultivo de alfalfa, en términos de los macronutrientes, para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego, éstos se mantuvieron en el rango adecuado en comparación con lo reportado por diversos autores en la literatura. Por su parte, se detectó que el cultivo de alfalfa absorbió una mayor cantidad de elementos traza con respecto a la requerida para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.

Finalmente, referente a la calidad del suelo, los resultados obtenidos revelaron que el empleo de agua residual parcialmente tratada y de láminas de riego menores a la que se emplea actualmente mantienen el contenido de nutrientes (nitrógeno y fósforo disponible) y materia orgánica del suelo. La conductividad eléctrica de la solución del suelo fue menor cuando se empleó agua residual parcialmente tratada con respecto al agua residual cruda. Además, se observó una disminución en la conductividad eléctrica de la solución del suelo conforme la lámina de riego fue menor. El mismo comportamiento mostró el sodio en los dos tipos de agua y las tres láminas de riego. Por su parte, la concentración de calcio y magnesio en la solución del suelo se mantuvo en los mismos niveles con el empleo de los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.

Por lo anterior, se concluyó que el empleo de una lámina de riego menor a la actualmente empleada en el Valle de Tula, es factible dado que permite disminuir en un 50% el aporte de nutrientes, materia orgánica y sales en los lixiviados, al mismo tiempo que mantiene la productividad y calidad del cultivo de alfalfa, así como la reserva de nutrientes y materia orgánica del suelo y un buen nivel de lavado de sales del riego en el mismo.

INTRODUCCIÓN

El uso de aguas residuales para el riego agrícola es una opción económica para el destino final del agua, así como una medida para proveer al suelo de este recurso, sobre todo en las regiones áridas y semiáridas. Además, constituye una forma de reciclar nutrientes y materia orgánica (Friedel *et al.*, 2000). Sin embargo, es necesario considerar que además de nutrientes y materia orgánica, el agua residual contiene sales solubles, compuestos orgánicos, compuestos tóxicos y patógenos. Por ello, su empleo debe hacerse con medidas adecuadas para evitar daños a la salud de la población expuesta, la contaminación de acuíferos y la salinización de la capa arable (Siebe, 1998).

Un ejemplo del uso de aguas residuales para el riego agrícola ocurre con el agua residual de la Ciudad de México, la cual es enviada desde 1890 al Valle de Tula mediante tres salidas artificiales: el Emisor Central, el Emisor Poniente y el Gran Canal (Sotomayor, 1998). Dicha agua es empleada sin tratamiento alguno para el riego de 100, 000 ha (Vivanco *et al.*, 2001). En el Valle de Tula, una población aproximada de 495,000 habitantes que se dedican principalmente a la agricultura valoran el agua residual, debido a que mejora la calidad del suelo por su contenido de materia orgánica y de nutrientes, quienes a su vez aumentan la productividad y disminuyen el consumo de fertilizantes (Sotomayor, 1998).

En el Valle de Tula, Los principales cultivos son el maíz y la alfalfa, los cuales representan del 60 al 80% de la producción. En segundo término, se cultiva avena, cebada, frijol y en menor proporción trigo y hortalizas (Siebe, 1994). La escasa precipitación en promedio de 550 mm y la elevada evapotranspiración de 1750 mm aunado al alto contenido de sales en el agua de riego, hace necesaria la aplicación de elevadas láminas de riego (1.5 a 2.2 m/año) para evitar la afectación del suelo por sales. El empleo de dichas láminas de riego y el transporte de las aguas negras a lo largo de canales sin revestir, han resultado en un aumento de la recarga del acuífero local e incluso de nuevos depósitos de agua subterránea (Jiménez *et al.*, 2004). Es importante mencionar, que el agua de recarga es tratada por el suelo, el cual funciona como un sistema de tratamiento natural (*soil aquifer treatment*, SAT), aunque de manera no controlada, en donde la remoción de contaminantes se produce por procesos físicos,

químicos y biológicos al interactuar el agua con el suelo, las plantas, los microorganismos y la atmósfera (Metcalf y Eddy, 2003).

No obstante, el aporte de nutrientes al suelo a través del agua residual excede los requerimientos de los cultivos. Por ejemplo, el aporte promedio de N y P a la alfalfa por las aguas residuales es de 527 kg de N/ha y 227 kg de P/ha, cantidades que son superiores en un factor de 1.5 a 8 (Feigin *et al.*, 1991). La cantidad de nutrientes recomendada para ser aplicada en el tipo de suelo de la región es menos de la mitad de la cantidad aportada por las aguas residuales, es decir, 40kg de N/ha y 53kg de P/h. Un exceso de nutrientes que no se alcanza a absorber, contamina los acuíferos y cuerpos de agua superficiales por lixiviación y escorrentía (Esteller, 2002). De hecho, se han detectado concentraciones superiores de nitratos (hasta de 70 mg N-NO₃/L) en algunos manantiales y pozos que sirven de fuente de abastecimiento (BGS, 1998). Dicho valor es superior al que establece la norma de agua potable de menos de 10 mg N-NO₃/L. Por otro lado, existe evidencia de la lixiviación de fósforo, debido a un importante crecimiento de algas, en el manantial Cerro Colorado, el cual sirve como una fuente de abastecimiento.

Otra consecuencia observada por el riego con aguas residuales en el Valle de Tula, es la afectación por sales de los suelos. En las zonas más bajas del Valle de Tula existen sitios donde los niveles de agua subterránea han alcanzado la superficie del suelo. La mala calidad del agua de recarga y la falta de drenaje adecuado han dado como resultado la pérdida de tierras cultivables (2000 ha) por afectación por sales (Hernández, 1988).

De acuerdo con el BGS (1998), entre las alternativas propuestas para frenar la problemática observada en el Valle se incluyen: el tratamiento de las aguas residuales y el mejoramiento en la eficiencia de irrigación con aguas residuales, con ésta última se aportarían menores cargas de contaminantes al acuífero. Esta última opción es más viable si se combina con el empleo de agua residual tratada.

Por las razones anteriores, la presente investigación tuvo por objeto investigar el efecto del empleo de una lámina de riego menor a la que actualmente se usa en el Valle de Tula. Se ensayó tanto el empleo de agua residual cruda como de agua residual parcialmente tratada. En los diferentes ensayos, se comparó la reducción de contaminantes que lixivian al acuífero, la productividad de la alfalfa, la reserva de nutrientes y la acumulación de sales en el suelo.

En el capítulo 1 se presentan los fundamentos teóricos que sustentan la tesis. Este capítulo incluye aspectos generales del reúso de aguas residuales en riego agrícola, las ventajas del empleo de las aguas residuales por la presencia de compuestos de interés como los nutrientes y la materia orgánica. Además, aborda los problemas asociados al empleo de las aguas residuales en el riego agrícola los cuales son: (a) contaminación de aguas subterráneas por nutrientes (nitrógeno y fósforo), materia orgánica y sales, (b) contaminación de aguas superficiales por la presencia de fosfatos, y (c) afectación por sales a los suelos. De manera adicional, se incluye una sección sobre los aspectos a considerar para una planeación adecuada del riego con aguas residuales los cuales incluyen: (a) calidad del agua de riego, (b) determinación del requerimiento de riego, y (c) las necesidades de lavado de sales de los suelos. Finalmente, debido a que el suelo del Valle de Tula está funcionando como un sistema de tratamiento natural, se habla acerca del sistema SAT (soil-aquifer treatment) y sus mecanismos de remoción de los contaminantes.

El capítulo 2 contiene la descripción del problema, el empleo de aguas residuales para el riego agrícola en el Valle de Tula. Presenta además información acerca de las características generales del sitio de estudio, su ubicación e hidrogeología. Posteriormente, analiza el efecto que las prácticas de riego con aguas residuales en el Valle de Tula han tenido sobre (a) la recarga de acuíferos (b) la evolución de la calidad de las aguas subterráneas, y (c) las propiedades del suelo y los cultivos.

En el capítulo 3, se detalla la metodología, misma que se dividió en cinco partes, algunas de las cuales fueron realizadas en forma simultánea. Dichas partes consistieron en: a) muestreo, recolección y caracterización del suelo, b) establecimiento del experimento en condiciones de invernadero, c) muestreo y caracterización de aguas residuales, d) aplicación de láminas de riego y análisis de lixiviados, e) evaluación del desarrollo vegetativo de la alfalfa y f) caracterización del suelo al final del experimento. En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos en cada una de las etapas de experimentación, con su correspondiente análisis estadístico. Además se exponen las discusiones de dichos resultados.

Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

CAPÍTULO 1 Fundamentos teóricos

El empleo de aguas residuales para el riego agrícola, a nivel internacional, es una práctica común por sus innumerables ventajas entre las cuales destacan, la recarga del acuífero y el aumento en la productividad por el aporte de nutrientes y materia orgánica. Lo anterior, siempre y cuando se empleen prácticas adecuadas de irrigación y fertilización, que eviten la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, así como la afectación al suelo por exceso de sales. El objetivo de este capítulo es describir las ventajas y los problemas asociados al riego con aguas residuales, además de las consideraciones que deben tomarse en cuenta al emprender un proyecto de riego.

1.1 Reúso de aguas residuales para riego agrícola

El reúso de las aguas residuales para diversas actividades es una práctica milenaria del lejano oriente. Las primeras evidencias corresponden a la Grecia Antigua desde el año 3000 a. C. (Angelakis *et al.*, 2005). En lo que respecta al reúso de las aguas residuales en agricultura, existen evidencias de que han sido empleadas desde hace aproximadamente 5000 años (Kalavrouziotis *et al.*, 2005).

Actualmente, la experiencia internacional sobre el reúso de aguas residuales en riego agrícola es muy amplia. Existen por lo menos 20 países en los que se realiza esta práctica. En los Estados Unidos, se han registrado más de 3,400 proyectos de reutilización de agua. En China, más de 1 millón de hectáreas cultivadas dependen de la irrigación con aguas residuales. En Israel, Egipto, Túnez, Grecia, Sudáfrica, Japón, y en varios países latinoamericanos, la reutilización de aguas residuales proporciona un recurso sustancial para la producción agrícola (Cifuentes, 2000). Sin embargo, en cada sitio la práctica del riego con aguas residuales se realiza de forma diferente, siendo la diferencia principal el nivel de tratamiento del agua residual.

En México, por ejemplo, existen 26 distritos de riego que utilizan aguas residuales. El volumen empleado es de 108 m³/s y solamente 9 m³/s se someten a algún sistema de tratamiento. Destaca el caso del Valle de Tula ubicado en el estado de Hidalgo, pues representa el 43% del total de agua residual utilizada para este fin y el 34% del área

regada con agua residual en el país. Dichas aguas residuales no han recibido un tratamiento previo (Chávez, 2004).

1.2 Ventajas del empleo de aguas residuales en riego agrícola

1.2.1 Nutrientes

La principal ventaja del empleo de aguas residuales en riego agrícola es la presencia de elementos como el N y el P, que no se encuentran en el agua de primer uso (Hulugalle, 2004), y que son necesarios para los cultivos. Estos elementos, además del K, Ca, Mg, y S son considerados como macronutrientes de los cuales las plantas requieren grandes cantidades para desarrollarse (Thompson, 1988).

1.2.1.1 Nitrógeno

El nitrógeno es un elemento importante para la síntesis de proteínas. Las aguas residuales contienen cantidades considerables de este elemento, algunas veces como NH_4 y en menor proporción como nitrógeno orgánico. El nitrógeno presente en aguas residuales frescas, se convierte inicialmente en materia proteínica y urea. Posteriormente, es transformado por los microorganismos en amonio. En ambientes aerobios las bacterias pueden oxidar el nitrógeno amoniacal a nitratos, los cuales pueden ser utilizados por las plantas y animales para formar proteínas (Metcalf and Eddy, 2003). Por esto, la presencia de compuestos nitrogenados en las aguas residuales disminuye el empleo de fertilizantes y aumenta la productividad de los cultivos. Así mismo, la irrigación con aguas residuales puede influir en el ciclo del N en el suelo, incluyendo la absorción de N por parte de las plantas y su pérdida del suelo por desnitrificación. Lo anterior, se debe a que dada la ausencia de oxígeno en las aguas residuales se generan condiciones anóxicas y el carbono orgánico contenido en las aguas residuales es usado como fuente de energía por las bacterias que tienen capacidad de desnitrificar (Feigin, 1981).

1.2.1.2 Fósforo

El fósforo, se encuentra presente en las aguas residuales generalmente en forma de ortofosfatos, polifosfatos y en forma orgánica (Metcalf y Eddy, 2003). El fósforo como ortofosfato, es la forma en la cual el fósforo se encuentra disponible para el metabolismo biológico. Los polifosfatos, incluyen moléculas complejas que pueden sufrir hidrólisis en solución acuosa y convertirse en ortofosfatos. Finalmente, el fósforo orgánico se encuentra en menor cantidad en residuos domésticos, pero es un constituyente importante de residuos industriales y lodos residuales (Metcalf and Eddy, 2003). Cuando se aplica agua de primer uso, con excepción de la pequeña contribución hecha por la meteorización de los minerales primarios, los fertilizantes fosfatados representan la única fuente de P disponible que ingresa en el sistema. El P aportado al suelo por el empleo de aguas residuales, puede reemplazar la aplicación de fertilizantes fosfatados útiles para restituir el P exportado en la cosecha y para mejorar la fertilidad de los suelos deficientes en este elemento (Johnson *et al.*, 2004). Lo anterior se demostró en el trabajo de Kalavrouziotis *et al.* (2005), quienes compararon en invernadero, el efecto de aplicar repetidamente agua residual municipal tratada y agua de primer uso sobre el estatus de macro y microelementos en suelo y plantas (cebolla (*allium cepa*) y lechuga (*lactuca sativa*). Con respecto al fósforo, los resultados mostraron que dicho elemento se acumuló en cantidades considerables en el suelo al emplear aguas residuales tratadas siendo del 131% para el suelo con plantas de cebolla y 97% para el suelo con lechuga, con respecto al suelo regado con agua de primer uso.

1.2.1.3 Materia orgánica

Los compuestos orgánicos están compuestos de una combinación de carbono, hidrógeno y oxígeno junto con nitrógeno, en algunos casos. La materia orgánica en aguas residuales típicamente consiste de proteínas (40 a 60%), carbohidratos (25 a 50%) y grasas y aceites (8 a 12 %). Además, contiene cantidades pequeñas de una gran variedad de moléculas orgánicas sintéticas con estructuras variables que van desde simples hasta extremadamente complejas. La importancia de la materia orgánica para el suelo, radica en su relación con numerosas propiedades: a) físicas (densidad, capacidad de retención de agua, agregación, color y temperatura), b) químicas (reserva de nutrientes como N, P, S y otros, pH, capacidad de intercambio catiónico, capacidad

tampón, formación de quelatos) y c) biológicas (biomasa microbiana, actividad microbiana, fracciones lábiles de nutrientes). La materia orgánica es reserva de numerosos nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. Además, contiene aproximadamente un 58% de C y presenta una relación C/N/P/S estimada en 140:10:1.3:1.3 (García, 2003).

Robles (1996), evaluó los efectos de la aplicación de agua residual de origen doméstico y agua de pozo sobre los parámetros físicos y químicos de un suelo agrícola y sobre el crecimiento y la producción de biomasa de siete especies hortícolas. Los resultados respecto de las propiedades físicas del suelo irrigado con aguas residuales mostraron que dichas propiedades mejoraron como consecuencia del aumento en el aporte de materia orgánica, reflejándose en la disminución de la densidad aparente y el aumento de la capacidad de retención de agua, lo anterior no se observó cuando se usó agua de pozo.

1.2.2 Recarga de acuíferos

El incremento de la demanda de agua, particularmente en regiones áridas y semiáridas, aunado a que el proceso de recarga natural de los acuíferos es muy lento, ha originado la necesidad de encontrar fuentes alternas de agua para la recarga artificial de los mismos. A pesar de que existen varias fuentes disponibles de agua para la recarga, los recursos no convencionales como las aguas residuales municipales han ganado popularidad debido a que, por un lado, son probablemente el único recurso cuya disponibilidad global aumenta de manera estable y por otro, se encuentra disponible para el reuso a un costo relativamente bajo (Foster y Chilton, 2004).

El riego agrícola con aguas residuales contribuye a la recarga de los acuíferos. Se considera un método de recarga indirecta, algunas veces no planeado, donde las aguas residuales que se aplican sobre el suelo se infiltran a través de la zona vadosa hacia el acuífero, con la ventaja adicional de que la zona vadosa actúa como un filtro que mejora la calidad del agua que percola a través del suelo. Los procesos de remoción de contaminantes incluyen: a) procesos físicos como la filtración y adsorción, b) procesos químicos como la precipitación química, oxidación y reducción química y c) procesos biológicos como la conversión y degradación microbiana. Posteriormente, el agua

residual tratada a través del suelo se desplaza lateralmente a través de la zona saturada del acuífero donde recibe un tratamiento adicional por dispersión y dilución (Nema *et al.*, 2001).

Este sistema de tratamiento natural se conoce como Soil Aquifer Treatment ó SAT. Los mecanismos de remoción de los contaminantes de interés para este proyecto se describen a continuación:

1.2.3 Remoción de nitrógeno

La operación de estanques de infiltración ha demostrado la habilidad del suelo para reducir el contenido de nutrientes (nitrógeno y fósforo) presentes en las aguas residuales.

El nitrógeno orgánico que entra al suelo es rápidamente transformado a amonio, el cual es absorbido en las primeras capas del suelo y convertido a nitratos cuando existe oxígeno disponible. Los nitratos en la solución del suelo pueden ser absorbidos directamente por las plantas y/o por los microorganismos. Por su parte, la mezcla de materia orgánica con nitratos en condiciones anaerobias es un proceso necesario para la producción de compuestos gaseosos de nitrógeno que son liberados a la atmósfera (Brissaud, 2006).

1.2.4 Remoción de fósforo

De acuerdo con Bower y Rice (1984), la remoción del fósforo en el sistema SAT se debe a la precipitación de fosfatos de calcio. Linstedt (1982), señala a la adsorción como el principal mecanismo responsable. La abundancia de hidróxidos de aluminio y hierro en la zona no saturada indica que la adsorción es un mecanismo efectivo para la remoción de fósforo disuelto. Adicionalmente, la retención de fósforo por adsorción coloidal, filtración y sedimentación contribuyen a la remoción de fósforo no disuelto (Summer *et al.*, 1998).

1.2.5 Remoción de materia orgánica

La mayoría de los compuestos orgánicos degradables presentes en el agua residual ya sean solubles o insolubles, son eliminados (generalmente más rápido bajo condiciones aeróbicas) por degradación microbiana. Los microorganismos responsables de esta

degradación suelen estar asociados a películas que se desarrollan sobre la superficie de las partículas del suelo, vegetación y desechos vegetales (Metcalf y Eddy, 1995).

Con el empleo del sistema SAT es posible obtener un efluente con una remoción considerable de sólidos suspendidos, un contenido de materia orgánica, en términos de carbono orgánico disuelto (COD), menor o igual a 60 mg/L y un contenido de nitrógeno menor o igual a 10 mg/L. Además, es posible la reducción de algunas unidades logarítmicas de bacterias y la remoción de elementos traza a través de la adsorción y la oxidación (Brissaud, 2006).

1.3 Desventajas del empleo de aguas residuales para riego agrícola

En términos generales, el uso continuo de aguas residuales para riego sin ningún tipo de control puede ocasionar problemas ambientales tales como: la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas, fitotoxicidad, pérdida de suelos por salinización e incidencia de malas hierbas y plagas. Además, representa un riesgo a la salud pública por el contenido de microorganismos patógenos y toxinas (Bradford, 2002). Por lo anterior, su uso en agricultura y tratamiento en el suelo debe practicarse con medidas de seguridad adecuadas.

1.3.1 Contaminación de aguas subterráneas y superficiales

La agricultura es la principal fuente de nitrógeno y fósforo en las aguas subterráneas y superficiales. El nitrógeno afecta principalmente la calidad de las aguas subterráneas, mientras que el fósforo causa la eutrofización de aguas superficiales (Saarijärvi *et al.*, 2004).

1.3.1.1 Contaminación de aguas subterráneas por nitratos

El problema generado por nitrógeno en exceso, dada la movilidad de éste, es la lixiviación hacia el acuífero en forma de nitratos. La consecuencia es un incremento en las concentraciones de este ión en las aguas subterráneas empleadas para el consumo humano (Schalscha, 1979). La importancia del exceso de nitratos en agua de consumo humano, en términos de salud pública, se debe a su relación con la enfermedad de la metahemoglobinemia que afecta a los niños. La metahemoglobinemia consiste en la

incapacidad de la hemoglobina para acarrear el oxígeno debido a que los nitritos han oxidado la parte ferrosa de la molécula al estado férrico (Boylston y Beer, 2002). Fewtrell (2004), recopiló información sobre la relación entre elevadas concentraciones de NO_3 en agua de consumo y la metahemoglobinemia. Las conclusiones más relevantes a las que se llegó fueron que a pesar de que en un inicio se había aceptado a los nitratos como causantes de la hemoglobinemia, hoy en día, se cuestiona la asociación entre nitratos y metahemoglobinemia en términos de que el nitrato es un cofactor en algunas de las causas de esta enfermedad. El cuestionamiento se debe a la baja incidencia de metahemoglobinemia en sitios con altas concentraciones de nitratos. A pesar de ello, la concentración de nitratos sigue estando limitada en la mayoría de las normas de agua potable a 10 mg/L de N-NO_3 (Metcalf y Eddy, 1991), como es el caso de México.

1.3.1.2 Contaminación de aguas subterráneas por Fósforo

El fósforo aplicado en cantidades que exceden la requerida por los cultivos se acumula en los perfiles del suelo. Sin embargo, cuando la capacidad de sorción de los suelos se satura, el transporte vertical del fósforo, a través del perfil del suelo, provoca la contaminación de aguas subterráneas (Chardon, 2007). De acuerdo con Zvomuya (2006), la lixiviación de fósforo es un problema importante sobre todo en suelos con drenaje deficiente y altos contenidos de materia orgánica, así como en suelos con una larga historia de aplicación de aguas residuales. Lo anterior, implica un riesgo potencial de contaminación de acuíferos no confinados que se encuentran a profundidades someras.

1.3.1.3 Contaminación de aguas subterráneas por sales

El impacto del riego agrícola en la contaminación de las aguas subterráneas por sales puede dividirse en dos procesos principales: 1) concentración de sales como resultado de la toma de agua por la planta y 2) movimiento de dichas sales en la zona saturada hacia las aguas subterráneas. El primer proceso se refiere a que el agua que deja la zona de raíces es siempre de mayor salinidad que el agua de irrigación. Esto se debe a que las plantas toman el agua y dejan la mayoría de las sales en la solución del suelo. Dicha salinidad se incrementa en ausencia de dilución o precipitación. Las sales almacenadas

en la zona no saturada son desplazadas o disueltas en la siguiente irrigación contaminando las aguas subterráneas (Suarez, 1989).

1.4 Desventajas de la recarga de acuíferos con aguas residuales

Es necesario establecer cuáles son los beneficios del incremento de la recarga frente al riesgo de la contaminación de las mismas. En términos generales, es de esperar un deterioro importante de la calidad de las aguas subterráneas, el cual se produce de forma lenta pero persistente (Antón y Delgado, 2000).

Un ejemplo del efecto contaminante por el empleo de aguas residuales en riego es lo ocurrido en el acuífero del Valle de León, Guanajuato, el cual ha sufrido un deterioro de la calidad de sus aguas, dada la presencia de contaminantes en el agua residual. De acuerdo con Esteller (2002), se puede distinguir fácilmente entre el agua subterránea afectada por la infiltración de las aguas residuales y el agua no contaminada, al compararse la calidad del agua en los perfiles de los pozos ubicados en las zonas de riego con aguas residuales, con respecto a los que se ubican en zonas de riego con aguas subterráneas. Lo anterior, debido a que en los primeros se encuentran elevadas concentraciones de los iones mayoritarios (Ca^{+2} , Na^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{-2} y NO_3^-). Además, se pudo constatar que la materia orgánica presente en el agua infiltrada se oxida a profundidades someras, transformándose en dióxido de carbono y que el nitrógeno se oxida a nitrato. El sodio es intercambiado por el calcio y precipitan ciertas cantidades de sulfato de calcio.

1.4.1 Contaminación de aguas superficiales

El fósforo presente en las aguas residuales, es uno de los elementos de mayor importancia en términos de contaminación de aguas superficiales. La aplicación repetida de grandes concentraciones de dicho elemento a los suelos puede exceder la capacidad de absorción de los mismos e incrementar las pérdidas de fósforo por lixiviación como fosfatos (en menor medida que el N), a través del drenaje superficial. Además los fosfatos pueden ser absorbidos sobre la materia orgánica que en la solución del suelo puede encontrarse de forma particulada, coloidal y disuelta, siendo difícil distinguir entre éstos dos últimos tipos. La absorción de fosfatos a la materia orgánica ocurre con mayor fuerza en suelos con drenaje deficiente. El transporte de materia orgánica coloidal o disuelta a través del suelo moviliza en consecuencia importantes

cantidades de fosfatos hacia las aguas subterráneas (Addiscott, 2000). Lo anterior resulta en una aceleración de los procesos de eutrofización de cuerpos de agua. Esta última consecuencia es la principal preocupación ambiental relacionada con el contenido de P en las aguas residuales (Johnson, 2004).

La eutrofización genera abundancia de macrofitas, así como el incremento del crecimiento de algas que generan turbidez e imparten un color verde al agua. Los lagos eutrofizados tienen un valor ecológico reducido dado que son dominados por muy pocas especies. No obstante, un problema de particular importancia es la producción de toxinas por ciertas especies de algas (cianobacterias) que son peligrosas cuando dichas aguas se emplean para consumo humano (Diederik *et al.*, 1998).

1.4.2 Afectación por sales al suelo debida a la irrigación

La afectación por sales del suelo debida a la irrigación es un problema común dado que, las diferentes fuentes de agua empleadas para el riego contienen sales disueltas, aunque en proporciones diferentes. Cuando las plantas usan el agua, dejan las sales en la solución del suelo y eventualmente se acumulan en el mismo. Los problemas más comunes de afectación por sales a los suelos son la salinidad y la sodicidad. La primera, se refiere a una concentración de sales solubles suficientemente alta para reducir el potencial osmótico, que produce desecación de la planta. La sodicidad, por su parte, se refiere a la presencia excesiva de iones de sodio. Esta última condición causa principalmente afectación de la estructura del suelo, disturbios en la nutrición mineral y toxicidad (Läuchli y Epstein, 1990). Por lo anterior las sales acumuladas en la zona de raíces deben ser lavadas aplicando un volumen de agua adicional, determinado con base en la tolerancia de los cultivos a las sales. El paso anterior es crucial en el control de la afectación por sales de los suelos y deberá realizarse de manera adecuada, dado que cuando se aplica agua en exceso para el lavado se genera el incremento de los niveles freáticos requiriendo sistemas de drenaje para evitar que agua salina ascienda por capilaridad a la zona de raíces, con la consecuente deposición de sales en el perfil del suelo. Este problema es acelerado por el empleo de agua de mala calidad, como son las aguas residuales para el riego de los cultivos.

Como se vio anteriormente, el balance de sales en el suelo se ve afectado por la cantidad y calidad del agua de riego y por la efectividad del lavado y del drenaje (Richards,

1954). Debido a lo anterior, es importante considerar estos aspectos al establecer un proyecto de irrigación, para disminuir la afectación del suelo por sales. En el apartado siguiente, se proporciona información acerca de dichos aspectos divididos en tres subtemas, los cuales son: a) calidad del agua de riego, b) determinación del requerimiento de riego y c) necesidad del lavado de sales de los suelos. Cuando el agua empleada para el riego es agua residual, además de estos aspectos debe considerarse el contenido de nutrientes para evitar sobrefertilizar los cultivos, con el consecuente deterioro ambiental descrito en esta sección.

1.5 Proyectos de irrigación

1.5.1 Calidad del agua de riego

La calidad del agua para riego está determinada por la concentración y composición de los constituyentes disueltos que contenga. Las características más importantes que determinan la calidad del agua para riego son: 1) la concentración de sales solubles, 2) el efecto probable del sodio sobre las propiedades físicas del suelo y 3) el contenido de elementos tóxicos para las plantas (Contreras y Martínez, 1996).

De acuerdo con Richards (1954), las aguas que tienen una conductividad eléctrica menor de 2.5 dS/cm pueden ser empleadas para riego dado que no promueven una acumulación de sales en el suelo.

1.5.2 Determinación del requerimiento de riego

El requerimiento de riego se define como la suma de la evapotranspiración y el requerimiento del lavado menos el valor de la precipitación efectiva (Contreras y Martínez, 1996); expresándose de la siguiente forma:

$$Rr = Et + Rl - Pe \quad \text{Ecuación (1)}$$

donde

Rr : requerimiento de riego (cm)

Et : evapotranspiración (cm)

R_l : requerimiento de lavado (cm)

Pe : precipitación efectiva (cm)

El requerimiento de riego en un cultivo, para una parcela dada, puede diferir principalmente, en función del tipo de suelo, de cómo riega el agricultor, del microclima y del método general del cultivo que esté empleando dicho agricultor.

1.5.2.1 Estimación de la evapotranspiración

La evapotranspiración es la cantidad de agua utilizada por las plantas para realizar sus funciones de transpiración más el agua que se evapora de la superficie del suelo en el cual se desarrolla. Es importante distinguir entre la evapotranspiración potencial y la real, definiéndose la primera como la demanda evapotranspirativa dada por los factores climáticos. La evapotranspiración potencial es una función neta de la energía radiante que recibe un cultivo, por lo que su estimación se basa generalmente en la medición de algunos factores climatológicos que también varía en función de dicha energía (Palacios, 1981).

Métodos para estimar la evapotranspiración.

Los procedimientos para estimar la evapotranspiración se clasifican en directos e indirectos. Los primeros, proporcionan el consumo total del agua requerida y se mide utilizando aparatos e instrumentos para la determinación. Los indirectos, hacen una estimación del agua de evapotranspiración de todo el ciclo vegetativo y emplean fórmulas empíricas.

Existen por lo menos tres metodologías para estimar la evapotranspiración potencial: a) los basados en la medición de la radiación solar, que son los más precisos y entre los cuales destacan la modalidad establecida por Penman y el método de Jensen y Haise, b) los basados en la medición de la evaporación en tanque que aparentemente integra muchos de los factores que afectan la evapotranspiración potencial y c) los indirectos, por medio de factores climatológicos como son: temperatura, humedad, viento y horas luz entre los que destaca el método de Blaney y Criddle (Palacios, 1981). Éste último

método fue empleado para la determinación de la evapotranspiración en la presente tesis y su descripción a detalle se encuentra en el anexo 1.

1.5.3 Riegos y lavados con relación al control de la salinidad

Se entiende por irrigación, la aplicación de agua al suelo con el fin de proporcionar a las plantas un medio ambiente favorable. El lavado, en la agricultura, es el proceso de disolución y transporte de sales solubles por el movimiento del agua del suelo hacia y a través del mismo (Richards, 1954).

1.5.3.1 Necesidades de lavado

La necesidad de lavado puede definirse como la fracción de agua de riego que debe percolarse a través de la zona de las raíces para controlar la salinidad en un determinado nivel. Las necesidades de lavado dependerán de la concentración de sales presentes en el agua de riego y de la máxima concentración permisible en la solución del suelo. La necesidad de lavado (NL), es simplemente la relación de la profundidad equivalente del agua de drenaje con respecto al agua de riego y puede expresarse en fracciones o en porcentaje. Esta relación es igual a la inversa de la relación correspondiente a las conductividades eléctricas (Richards, 1954), es decir:

$$NL = \frac{CE_{ar}}{CE_{ad}} \quad \text{Ecuación} \quad (2)$$

donde

NL : necesidades de lavado

CE_{ar} : conductividad eléctrica del agua de riego

CE_{ad} : conductividad eléctrica del agua de drenaje

CAPÍTULO 2 Descripción de la problemática

México es uno de los países más experimentados en la irrigación con aguas residuales con muchos estados operando bajo este esquema de riego. De entre ellos destaca el estado de Hidalgo y específicamente el Valle de Tula, el cual representa a nivel nacional el 43% del reúso de agua residual destinada al riego agrícola y el 34% en superficie regada. Esta práctica ha traído tanto efectos positivos como negativos en el suelo, el agua subterránea y los cultivos. El objetivo de este capítulo es describir las características generales del Valle de Tula, las prácticas de riego con aguas residuales y los efectos positivos y negativos de dicha práctica.

2.1 La agricultura en el Valle de Tula

2.1.1 Descripción general

El Valle de Tula, ubicado en el Estado de Hidalgo, constituye la región agrícola más grande y antigua irrigada con aguas residuales urbanas, a nivel mundial (Vivanco *et al.*, 2001). Dichas aguas provienen de la ciudad de México, en donde se generan alrededor de 40 m³/s, en promedio. Esta agua es enviada sin tratamiento alguno al Valle de Tula para el riego de diversos cultivos con una extensión de 45,214 ha., y sólo el 3.3% escurre a la Presa Endhó para ser usado aguas abajo, con el mismo fin (Antón y Delgado, 2000).

El empleo de las aguas residuales para riego en el Valle de Tula inició a principios del siglo XIX, cuando las aguas residuales de la ciudad de México comenzaron a enviarse a través de tres conductos artificiales: el Emisor Poniente, el Gran Canal y el Emisor Central, con el objeto de desalojar rápidamente tanto los excedentes de agua de lluvia como las aguas residuales (Jiménez *et al.*, 2004).

2.1.2 Ubicación

El Valle de Tula, conocido coloquialmente como Valle del Mezquital, se localiza en la parte suroeste del estado de Hidalgo, a una altitud media de 1 895 msnm. Está limitado al norte por el valle de Ixmiquilpan, al este por el valle y la sierra de Actopan, al oeste por la sierra de Xintla y al sur por el Estado de México. El valle de Tula cubre una

superficie aproximada de 2 429 km². En el Valle de Tula se encuentra el Distrito de Riego No. 003, Tula, integrado por 14 municipios, con una superficie de 52 270 has.

2.1.3 Condiciones climáticas

El clima del Valle de Tula es semi-árido con una temperatura media anual de 18.3 °C y lluvias durante el verano (junio a septiembre). La precipitación anual calculada para la zona es de 450 mm en la parte norte del Valle y 700mm en la parte sur. El potencial de evapotranspiración media anual es de 2 087 mm (BGS, 1998).

2.2 Prácticas agrícolas

La agricultura es la principal actividad económica del Valle de Tula complementándose con la producción ganadera. El Valle tiene una población aproximada de 495,000 habitantes que se dedican principalmente a actividades agrícolas, siendo su estándar de vida mayor que el de la población que no tiene acceso al uso del agua residual para el riego (Romero, 1997). Los principales cultivos del Valle son la alfalfa y el maíz los cuales representan de 60 a 80%, dependiendo del ciclo agrícola. En segundo término, se cultiva avena, cebada, frijol, trigo, chile, calabacitas y betabel, entre otros (Jiménez *et al*, 2004). La irrigación se realiza mediante inundación ó a través de surcos y las láminas de riego oscilan entre los 1.5 y 2.2 m/ha, en función del cultivo (la alfalfa requiere cantidades mayores que el maíz), del tipo de suelo (los vertisoles requieren más agua para alcanzar la capacidad de campo que los leptosoles) y la disponibilidad de agua a lo largo del año (Friedel, 2000).

La Tabla 2.1 muestra las hectáreas, número de riegos y las láminas de riego aplicadas a los cultivos del valle.

Tabla 2.1 Relación de cultivos por emprender. Distrito de Riego 003: Tula, Hidalgo. Año agrícola 2005-2006.

Ciclo/cultivo /variedad	Superficie (ha)			No Riego	Lámina (cm)		Volumen (miles de m ³)	
	sembrada	Física	Ha-riego		Neta	Bruta	Neto	Bruto
Otoño-invierno								
Avena forrajera	996	996	2,978	3	57.22	86.51	5,699	8,616
Cebada forrajera	704	704	2,122	3	58.16	88.34	4,094	6,216
Otros cultivos	1,251	1,251	5,039	4	78.78	119.33	9,854	14,929
Trigo	745	745	2,945	4	82.81	121.79	6,169	9,073
suma	3,696	3,696	13,084	3.5	69.85	105.08	25,818	38,837
Primavera-verano								
Calabacita	710	710	2,29	3.2	60.15	91.04	4,271	6,464
Chile verde	996	996	4,02	4.2	82.15	124.12	7,936	11,989
Frijol	2,224	2,224	7,177	3.2	61.42	93.24	13,658	20,736
Jitomate	5	5	20	4	80	123.08	40	61.5
Maíz	13,986	13,986	66,68	4.8	91.87	138.32	128,496	193,45
Otros cultivos	866	866	3,6	4.2	83.05	125.21	7,192	10,843
Tomate	117	117	480	4.1	79.66	119.49	932	1,398
suma	18,874	18,874	84,267	4.5	86.11	129.78	162,525	244,943
Perennes								
Alfalfa	26,511	26,511	209,566	7.9	146	222.84	387,055	590,768
Otros forrajes	708	708	5,421	7.7	148.57	225.86	10,518	15,99
suma	27,219	27,219	214,987	7.9	146.06	222.92	397,573	606,758
Otoño-invierno								
Acelga	0.1	0.1	0					
Ajo	500	500	0					
Suma	500.1	500.1	0					
Total	53,234	53,234	315,283				591,587	899,115

Fuente: CNA, 2005.

2.3 Calidad del agua residual empleada para el riego

El agua de irrigación en el Valle de Tula provee a los suelos y a los cultivos con agua, nutrientes y materia orgánica que incrementan la productividad. En lo que respecta a los contenidos de materia orgánica, las concentraciones de ésta oscilan entre 99 y 162 mg/L que corresponden a una entrada de 1950 a 2850 kg de carbono orgánico total (COT) por cada hectárea en un año (Friedel *et al.*, 2000). Referente a los nutrientes, las concentraciones medias de nitrógeno y fosfatos en las aguas residuales son de 29 mg/L y 39 mg/L respectivamente (Jiménez *et al.*, 2004). Las relaciones de carbono/nitrógeno son generalmente bajas (alrededor de 4). Además Siebe y Cifuentes 1995, calculan que 580 kg de N/ha/ año y 250 kg de P/ha/año, son provistos anualmente a los suelos por irrigación.

Con respecto al contenido de sales, el sodio es el catión dominante con una concentración de 8.9 meq/L, seguido por el calcio (Siebe, 1998). Las sales de sodio presentes en forma conjunta son: NaHCO_3 , NaCl y Na_2SO_4 . Cuando ocurren reacciones de hidrólisis se forma Na_2CO_3 . La conductividad eléctrica (CE) es de 2 a 3 dS/m. La composición iónica está determinada en su gran mayoría por bicarbonatos en una concentración de 6.14-10.29 mmoles/L, seguida por cloruros y finalmente sulfatos (Velásquez *et al.*, 2002). Por otro lado, las concentraciones de nitratos son despreciables en las aguas residuales sin tratar, pero aumentan en el agua de drenaje. El riesgo de salinidad es de media a alta y es marginalmente sódica (Velásquez *et al.*, 2002 y Siebe y Cifuentes, 1995).

2.3.1 Modificación de la calidad del agua residual

La calidad del agua residual se modifica en su recorrido. En los cuerpos de agua superficiales (ríos, canales y presas), dicha modificación ocurre mediante la degradación biológica, la fotólisis, la desorción, la oxidación, la precipitación y la dilución, que son procesos responsables de la capacidad autodepuradora de ríos y corrientes. Así mismo, en su paso a través del suelo el agua se limpia al actuar éste como un sistema de tratamiento natural (Soil Aquifer Treatment SAT), aunque de manera no controlada. En un estudio realizado en diversos puntos del Valle de Tula por Jiménez *et al.*, 2004, se observó que la materia orgánica biodegradable se reduce de 80 a menos de 10 mg/L y los fosfatos de 4 a menos de 1 mg/L, removiendo incluso compuestos difíciles de eliminar como los detergentes e incrementándose el oxígeno disuelto. En cuanto a los nutrientes se observó que el nitrógeno amoniacal prácticamente desaparece por su transformación en nitratos. En la parte norte del valle la calidad del agua tiene valores similares a los que se presentan a la salida de una planta de tratamiento a nivel secundario y con nitrificación parcial.

Con respecto al contenido de sales, de acuerdo al BGS (1998), su contenido fue similar en los canales y los drenes agrícolas en el periodo 1986-1998. Por su parte, para el canal principal Requena se observó que la conductividad y la concentración de los principales iones se incrementan a ritmo constante después del empleo de aguas de retorno para la irrigación. Los principales constituyentes del agua son Na, Ca, CO_3 y Cl.

2.4 Efectos por el empleo de aguas residuales

El empleo de aguas residuales para el riego agrícola en el Valle de Tula, ha traído cambios significativos tanto en la calidad del suelo, como en la calidad y cantidad del agua subterránea. Dichos cambios se describen a continuación.

2.4.1 Efecto sobre las propiedades del suelo y los cultivos

Por sus condiciones climatológicas, el Valle de Tula carece de agua de primer uso para la agricultura. Por lo anterior, el agua residual es altamente valorada por los agricultores al constituir un recurso hídrico. Los suelos en el área son una mezcla de arcillas y arenas, ligeramente alcalinos (pH 6.8-8.6) con capacidades de intercambio catiónico (CIC) de medias a altas (200 a >400 meq/kg) que permiten procesos significativos de intercambio de iones. Existe evidencia de que los suelos han cambiado de ser ricos en calcio a ser ricos en sodio, dado que el alto contenido de este último elemento desplaza los iones de calcio de la matriz del suelo (Siebe y Cifuentes, 1995).

2.4.1.1 Nutrientes

En lo referente a los nutrientes, las aguas residuales han mejorado el contenido de nitrógeno total y de fósforo disponible en los suelos del Valle de Tula (Jiménez *et al.*, 2004).

Nitrógeno

El contenido de nitrógeno en suelos con 80 años bajo riego ha aumentado ligeramente de un valor de 0.2 kg de N/m² en suelos de temporal a 0.8 kg de N/m², irrigados con aguas residuales (Jiménez *et al.*, 2004).

Diversos autores han evaluado el efecto de la irrigación de suelos con aguas residuales sobre la dinámica del nitrógeno. Por ejemplo, Ramírez *et al.*, 2002 evaluaron el efecto en la dinámica del nitrógeno en suelos irrigados con aguas residuales y aguas de drenaje agrícola en dos tipos de suelo (leptosoles y vertisoles) sometidos a tiempos diferentes de irrigación (1912, 1925, 1965, 1976, 1996 o 1997). Con respecto al nitrógeno, los resultados mostraron que las concentraciones medias de NH₄ fueron cuatro veces más grandes en suelos no irrigados que en leptosoles irrigados desde 1996. La concentración media de nitritos fue seis veces más grande en un vertisol irrigado desde 1912 que en un vertisol irrigado desde 1997. Las concentraciones de nitratos incrementaron

significativamente con el tiempo en un vertisol irrigado desde 1997, en un vertisol drenado desde 1925 y en un suelo no irrigado cuando el agua de drenaje fue aplicado. Las concentraciones más grandes de nitratos se encontraron en un vertisol irrigado desde 1925 y fueron 3.8 veces más grandes que en un vertisol drenado desde 1997.

Por su parte, Vivanco *et al.* (2001), cuantificaron los flujos de N que el agua residual aporta en tres tipos de suelos cultivados con forrajes e irrigados por diferentes periodos. Se analizaron además los efectos con dos tipos de agua: residual y de pozo y dos valores de humedad (66 y 133%). Las variables medidas fueron volatilización y mineralización de N *in situ* (en columnas) y potencial, absorción del N por la planta, empleando sulfato de amonio marcado (N^{15}) además de desnitrificación y fijación de amonio en condiciones de laboratorio y distribución de nitratos. Los resultados mostraron que la mineralización potencial e *in situ* no se relaciona con el tipo de agua de riego ni con el número de años. El amonio nativo y recientemente fijado varía de acuerdo al número de años regados con agua residual, este último de manera negativo. Con respecto a la desnitrificación, ésta en general, fue mayor en el suelo con 40 y 80 años de riego con agua residual con respecto al que no se ha regado con este tipo de agua. La concentración de nitratos se detectó en las partes más profundas del suelo, conforme avanzaba el ciclo de cultivo, para cada tratamiento en cada suelo. El nitrógeno se incrementó ligeramente con el tiempo, mientras que el fósforo incrementó significativamente.

Fósforo

Siebe (1998), evaluó la entrada de nutrientes al suelo y su absorción por la alfalfa durante largos periodos de riego con aguas residuales no tratadas en el Valle de Mezquital. Los resultados obtenidos mostraron que existe una correlación significativa entre el tiempo de irrigación y la cantidad de fósforo disponible en los suelos. Contrario al nitrógeno, el contenido de fósforo disponible en la capa arable ha aumentado de forma importante de niveles bajos a medios (2 a 9g de P/m²) para suelos de temporal (es decir sin riego con aguas residuales) hasta niveles de medios a altos (14 a 25g de P/m²) en suelos con 80 años de riego.

Materia orgánica

La materia orgánica del suelo ha incrementado de 1.6-3.3% en suelos no irrigados a 3.1-6.4 después de 80 años de irrigación con aguas residuales (Siebe, 1994, referenciado en Siebe *et al.*, 1995). Esto ha traído como ventaja la mejoría en la estructura de los suelos.

Afectación por sales

En el Valle de Tula, el exceso de sales en los suelos se controla a través de la aplicación de altas láminas de riego (1.5-2.2m/año de acuerdo con Jiménez *et al.*, 2004).

De acuerdo con el BGS (1998), uno de los principales elementos presentes en los suelos del valle es el sodio y los sitios regados con aguas residuales tienen el doble de concentración de sales con respecto a un sitio control. Por ejemplo, los dos sitios más cercanos a la entrada del agua residual del valle y vía el río Salado, San Jose Bojay y Bojayito, tienen las concentraciones más altas. Además, existe evidencia de problemas de salinización en suelos del Valle de Tula notablemente en sitios donde el nivel freático está cerca de la superficie, como en San Salvador. La salinización representa la pérdida de 2000 ha de tierras cultivables (Siebe y Cifuentes, 1995).

2.4.2 Recarga del acuífero

La recarga del acuífero proviene principalmente de las infiltraciones de los canales de riego sin revestir, del exceso de agua de irrigación en los campos de cultivo, y en menor proporción de aportes laterales del flujo subterráneo natural. El agua de lluvia también contribuye a la recarga, sin embargo, su aporte está limitado por la baja precipitación y alta evaporación (BGS, 1996). En 1998, el British Geological Survey (BGS) calculó que para la región del Valle de Tula de los 40 m³/s de aguas residuales empleadas para riego se infiltraban al acuífero por lo menos 25 m³/s, cantidad que equivale a 13 veces la recarga natural. La recarga incidental ha ocurrido en tal magnitud y por tanto tiempo que los niveles piezométricos del agua del subsuelo se han elevado considerablemente de tal manera que hoy en día en sitios donde el agua subterránea se encontraba a más de 50 m de profundidad afloran manantiales con gastos de 40 a 600 L/s. Estas fuentes de agua constituyen hoy en día, el único suministro para todas las actividades de la región un ejemplo de la aparición de afloramientos es el manantial Cerro Colorado. (Jiménez *et al.*, 2004).

No obstante, debido a que dicha recarga ha ocurrido de manera no planeada han ocurrido importantes cambios en la calidad de aguas subterráneas que demuestran la infiltración de aguas residuales.

2.4.2.1 Evolución de la calidad del agua subterránea

En los estudios realizados por el BGS en 1996 y 1998, se confirmó que las aguas subterráneas en el centro del Valle de Tula y las aguas residuales para el riego tienen una composición química muy parecida en términos de los iones mayoritarios (Na, Ca, Cl y CO₃) que refleja la entrada de aguas residuales. El agua subterránea exhibe un amplio rango de concentraciones con conductividades eléctricas que van desde 0.84 a 3.15 dS/m. Una pobre calidad de las aguas subterráneas se asocia con las áreas más antiguas de irrigación cerca del río Salado. Las aguas subterráneas de los márgenes del Valle son de tipo bicarbonato de sodio y baja conductividad eléctrica (0.4 a 0.8 dS/m) y quizá representan la calidad original de las aguas subterráneas.

Por su parte, iones como nitratos y cloruros son buenos indicadores del impacto de las aguas residuales en el Valle de Tula. Casi todas las aguas subterráneas tienen concentraciones medibles de nitrato que se correlacionan con la concentración de cloruro. Altas concentraciones de nitrato son encontradas en aguas subterráneas empleadas en la irrigación al norte de Actopan. Por su parte, altas concentraciones de cloruros se observan alrededor de Tlaxcoapan y en la zona de descarga en Progreso que son parte de las áreas de irrigación más antiguas.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar, a nivel invernadero, la factibilidad de usar una lámina de riego menor a la actualmente usada en el Valle de Tula, en términos de la reducción de contaminantes (nutrientes, materia orgánica y sales) al acuífero, la productividad de la alfalfa y el contenido de nutrientes y materia orgánica del suelo, así como el lavado de sales del mismo.

METAS

1. Determinar teóricamente la lámina de riego requerida para el cultivo de alfalfa, en el Valle de Tula.
2. Comparar el efecto sobre la calidad del lixiviado del riego, el cultivo de alfalfa y el suelo, al emplear diferentes láminas de riego con agua residual cruda y parcialmente tratada.
3. Recomendar una lámina de riego adecuada para modificar el manejo del riego agrícola y operar el suelo del Valle de Tula como un sistema de tratamiento natural Soil-Aquifer Treatment (SAT).

HIPÓTESIS

Aplicar una lámina de riego menor a la que se usa actualmente en el Valle de Tula reduce el contenido de nutrientes, materia orgánica y sales en el lixiviado, mantiene la productividad y calidad del cultivo de la alfalfa, conserva el contenido de nutrientes y materia orgánica del suelo y evita la acumulación de sales en el mismo.

ALCANCES

El experimento se realizó utilizando como especie vegetal a la alfalfa (*Medicago sativa*), dado que representa del 60 al 80% de la producción vegetal. Además, esta especie es altamente demandante de agua y de nitrógeno.

Se empleó un solo tipo de suelo, el cual se eligió con una textura media que permitiera minimizar los efectos de flujos preferenciales en las columnas inalteradas de suelo a emplear.

Se eligieron dos tipos de agua residual: agua residual cruda y agua residual parcialmente tratada. La primera para simular las condiciones actuales de riego en el Valle de Tula, mientras la otra, debido a los planes existentes de la construcción de plantas de tratamiento de las aguas residuales en el Valle.

El experimento se realizó a nivel de invernadero, en donde se controló la temperatura y la humedad relativa. Además, se pudo construir un sistema de recuperación de lixiviados.

El experimento se realizó en columnas inalteradas de suelo con una profundidad de 30 cm, a la cual se llevan a cabo la mayoría de los procesos de importancia en el presente experimento.

CAPÍTULO 3 Metodología

El siguiente capítulo presenta la metodología empleada para cada una de las partes en las que se dividió la experimentación. Con el propósito de cumplir los objetivos propuestos, el trabajo se dividió en cinco partes. La primera parte del experimento, consistió en la selección del sitio de muestreo del suelo, la recolección y caracterización del mismo. En la segunda parte, se instalaron las columnas empacadas de suelo en el sistema de extracción de lixiviados en condiciones de invernadero. La tercera parte, correspondió al muestreo y caracterización de las aguas residuales empleadas y se realizó simultáneamente con la aplicación de láminas de riego y la obtención de muestras de lixiviados para su análisis. La cuarta parte se llevó a cabo al final del experimento y en ésta se procedió a efectuar el corte de la alfalfa para hacer las determinaciones correspondientes del desarrollo vegetativo. La quinta parte se realizó de manera simultánea y consistió en la caracterización final del suelo.

3.1 Muestreo, recolección y caracterización del suelo

3.1.1 selección y ubicación del sitio de muestreo

Se seleccionó un suelo de textura media para minimizar los efectos de flujos preferenciales en las columnas. Dicho tipo de suelo se encontró y recolectó en el Rancho “Chihuahua” en Atitalaquia, ubicada a 71 kilómetros de la capital del Estado de Hidalgo. Las coordenadas del sitio de muestreo se ubican en 20°04'20.84" de latitud norte y 99°12'04.79" de longitud oeste. Las características del suelo empleado se asemejan a un feozem y tuvo una edad de riego con aguas residuales crudas de 40 años.

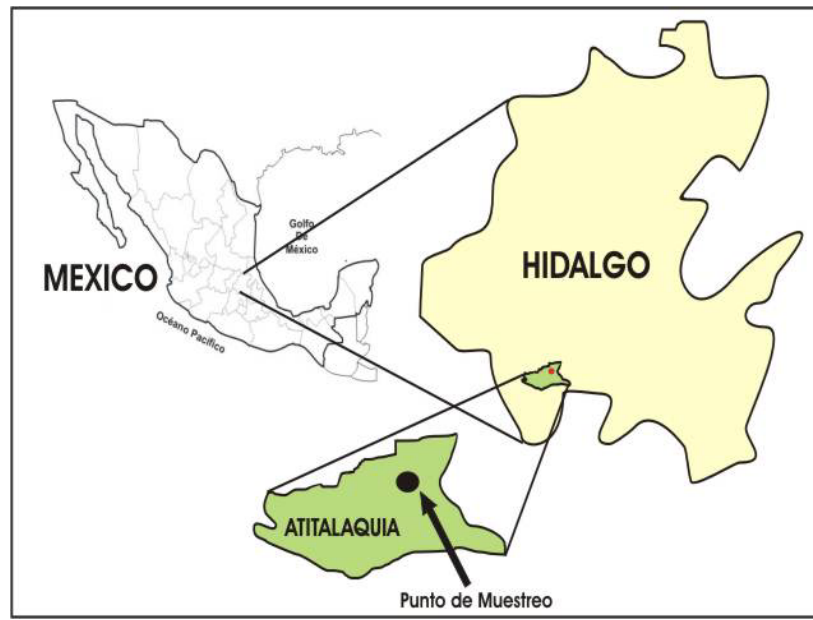


Figura 3.1 Ubicación del sitio de muestreo y recolección del suelo.

3.1.2 Recolección del suelo

Se recolectaron columnas inalteradas de suelo. Para ello se emplearon 24 columnas de acero inoxidable cuyas dimensiones fueron 30 cm de altura y 15 cm de diámetro. Las 24 columnas fueron colocadas en una parcela (surco) con una distancia aproximada de 30 cm entre el centro de cada columna (Figura 3.2a) e introducidas en el suelo con la ayuda de un marro de cabeza plástica, golpeando sobre una superficie de plástico de alta densidad (Figura 3.2b). La extracción de las columnas se realizó excavando una zanja junto a las columnas y enterrando una pala lateralmente en la parte inferior de las mismas (Figura 3.2c). Finalmente, las columnas se colocaron en bolsas de plástico y se transportaron hasta el laboratorio en donde fueron conservadas a una temperatura de 4°C, hasta el momento de su uso.



a) b) c)

Figura 3.2 Recolección del suelo a) presentación de las columnas en el surco, b) hincado de las columnas en el suelo y c) extracción de las columnas empacadas de suelo

3.1.3 Caracterización fisicoquímica del suelo

El suelo se caracterizó al inicio y al final del experimento respecto de los parámetros que se muestran en la Tabla 3.1, excepto para la textura, la cual se realizó sólo al inicio del experimento. Con el objetivo de evaluar el efecto de los tratamientos sobre el estatus de nutrientes y materia orgánica del suelo se determinó nitrógeno total y fósforo disponible. Además, se evaluó el contenido de materia orgánica mediante el análisis de carbono orgánico. Para conocer el efecto de los tratamientos sobre el lavado de sales de los suelos se determinó la conductividad eléctrica en extractos acuosos del suelo en una relación 1:2.5 (peso:volumen).

Tabla 3.1 Parámetros y métodos empleados para caracterizar el suelo.

Parámetro	Método o Equipo de medición	Referencia
pH relación 1:2.5 en agua	potenciómetro	NOM-021-RECNAT-2000
Carbono orgánico (%)	Analizador elemental	-
Conductividad eléctrica (mS/cm) relación 1:2.5	Conductímetro	NOM-021-RECNAT-2000
Textura	Método de la pipeta	ISRIC, 1992
NT (%)	Analizador elemental	-
P olsen	Colorimetría	NOM-021-RECNAT-2000

3.2 Descripción del montaje experimental en invernadero

El experimento se llevó a cabo en el invernadero del Instituto de Geología de la UNAM, en un área aproximada de 2 m². La temperatura del sitio se mantuvo controlada entre los 19 y 24°C para mantener condiciones climáticas similares a las encontradas en el Valle de Tula, para cada uno de los meses que contempló el experimento.

3.2.1 Características de las columnas

La Figura 3.3 muestra los componentes del modelo físico empleado para simular las condiciones de riego en el Valle de Tula. Dicho modelo consistió en una serie de columnas (figura 3.3a) que se colocaron dentro de una base de polímero de alta densidad en forma de embudo. Sobre esta base se superpuso una base con múltiples perforaciones y sobre éste un filtro de una mezcla de ésteres de celulosa de tamaño de poro de 5 micras el cual permitió mantener vacío en el sistema (figura 3.3b). Finalmente, sobre el filtro se colocó 1 cm de arena de cuarzo con el objetivo de evitar el taponamiento de los poros del filtro.

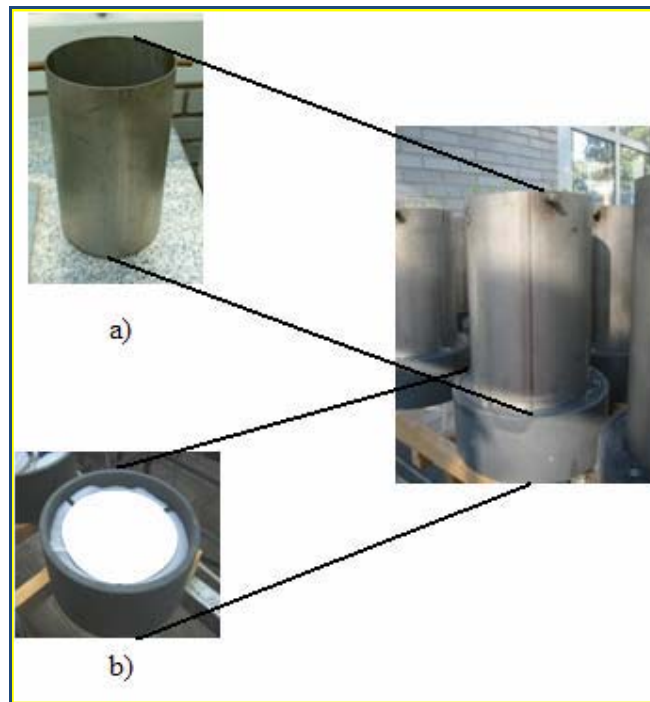


Figura 3.3 Componentes de las columnas a) columna y b) base de polímero de alta densidad sobre la cual se colocaron las columnas.

3.2.2 Características del sistema de extracción de lixiviados

La Figura 3.4 muestra el sistema montado para la extracción de lixiviados. Este sistema consistió de mangueras conectadas a cada una de las bases de las columnas, unidas mediante tubos de vidrio a matraces Kitazato con capacidad de 500 ml, donde se recuperó el lixiviado (Figura 3.4a) Este lixiviado percoló a través del suelo por acción de la gravedad. No obstante, los matraces estuvieron acoplados a una línea de succión forzada por boquillas de acero y éstas a una tubería de cobre (Figura 3.4b) que se enlazó a una bomba de vacío de 1 HP cuyo objetivo fue recuperar lo lixiviados al final del riego cuando el suelo se encontraba saturado y el lixiviado dejaba de fluir.



a)

b)

Figura 3.4 Sistema de extracción de lixiviados a) recuperación de lixiviados y b) línea de succión forzada

3.2.3 Diseño experimental

La Figura 3.5 muestra el diseño experimental empleado para simular las condiciones de riego en el Valle de Tula, la extracción de lixiviados y la distribución de los tratamientos empleados. El diseño experimental fue de la siguiente manera: de las 24 columnas montadas se emplearon 12 columnas para el riego con agua residual cruda y 12 columnas para el riego con agua residual parcialmente tratada. Para los dos tipos de agua residual, en la primera fila de izquierda a derecha se regó con el tratamiento lámina aplicada (LA), en la segunda fila se usó el tratamiento lámina media (LM) y finalmente en la tercera fila se empleó el tratamiento lámina calculada (LC), se trabajó con cuatro

repeticiones para cada lámina en los dos tipos de agua residual. El procedimiento para la determinación de las láminas de riego se describe en la sección 3.4.

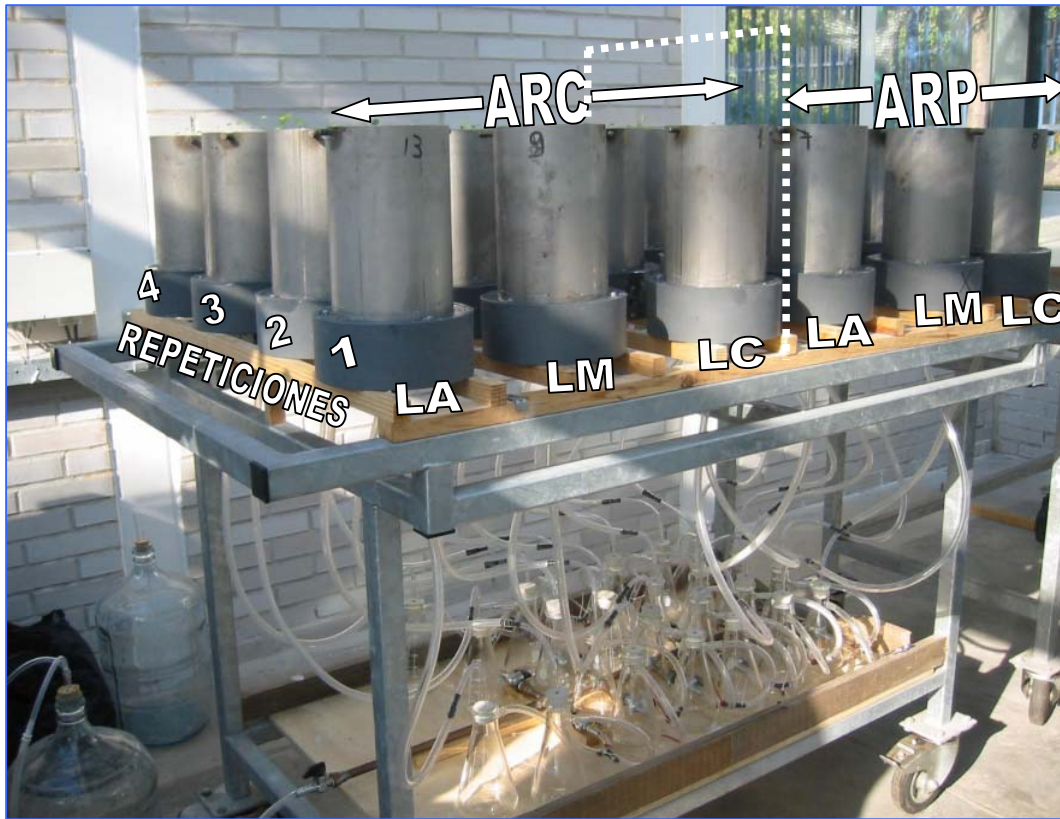


Figura 3.5 Esquema completo del sistema experimental montado para simular las condiciones de riego en el Valle de Tula, la extracción de lixiviados y el diseño experimental.

El riego se realizó aplicando, con la ayuda de regaderas de plástico, un volumen de 500 ml de agua residual cada 40 minutos aproximadamente. Lo anterior con el objetivo de no saturar el bordo libre de la columna hasta completar la lámina de riego requerida.

3.3 Muestreo y caracterización de las aguas residuales.

La Figura 3.6 presenta los sitios de muestreo de los dos tipos de aguas residuales empleadas para el riego. Las aguas residuales crudas (ARC) se obtuvieron de uno de los canales de riego del rancho “Chelita” en Atitalaquia, Hidalgo, mientras que las aguas residuales parcialmente tratadas (ARP) se obtuvieron del Canal Endhó en el Rosario, Hidalgo, éste último se deriva de la Presa Endhó.



a)



b)

Figura 3.6 Sitios de muestreo del agua residual a) canal de riego del Rancho “Chelita” en Atitalaquia, Hgo. y b) canal de riego Endhó en el Rosario, Hgo

La elección de este último sitio se hizo con base en la semejanza en su calidad con respecto al efluente obtenido de un sistema de Tratamiento Primario Avanzado (TPA) para los valores de nutrientes, materia orgánica y sales (Tabla 3.2). Dichas muestras se colectaron con una cubeta de plástico con capacidad de 12 L y se colocaron en garrafones de plástico con capacidad de 20 L para ser transportadas al invernadero.

Tabla 3.2 Comparación de la calidad del efluente de un sistema de Tratamiento Primario Avanzado TPA (Adaptado de Jiménez y Chávez, 2004) y el agua del Canal Endhó.

Parámetro	Efluente de un TPA	Canal Endhó
NTK (mg/L)	16.86	15.6
P total (mg/L)	2.7	2.2
DQO total (mg/L)	197	135
pH	7.03	7.4
Conductividad eléctrica (μS/cm)	1220	1116

3.3.1 Caracterización de las aguas residuales

Las aguas residuales se caracterizaron con base en los parámetros señalados en la Tabla 3.3. La conductividad eléctrica del agua residual se determinó inicialmente con el objetivo de conocer la fracción de agua requerida para el lavado de las sales del suelo, en términos de las necesidades de la alfalfa. A lo largo del experimento, este parámetro se empleó para conocer el lavado de sales de los suelos a lo largo del riego. La determinación de la DQO tuvo por objeto conocer los aportes de materia orgánica al suelo, la remoción a través de éste y los remanentes encontrados en los lixiviados. La medición de nitritos y nitratos, se realizó por su importancia en términos de salud pública, además de la realización del balance de masas del nitrógeno para conocer el destino del exceso de nitrógeno aplicado a los cultivos a través de las aguas residuales como se señaló en la revisión bibliográfica. Los cloruros, junto con el sodio tienen importancia desde el punto de vista de toxicidad para los cultivos cuando están presentes en el agua de riego. Además, están normados en la NOM-127-SSA-1994 de agua para uso y consumo humano. El calcio y el magnesio, junto con el sodio, se emplearon para conocer la calidad del agua de riego en términos de la Relación de Absorción de Sodio (RAS) para conocer el peligro de inducir sodicidad.

Tabla 3.3. Parámetros y métodos para caracterizar las aguas residuales.

Parámetro	Método ó equipo de medición
Conductividad eléctrica (mS/cm)	Conductímetro
DQO (mg/L)	HACH
NTK (mg/kg)	Kjeldahl
Amonio	Cromatógrafo de iones
Nitritos	Cromatógrafo de iones
Nitratos	Cromatógrafo de iones
Fosfatos	Cromatógrafo de iones
Sodio	Cromatógrafo de iones
Potasio	Cromatógrafo de iones
Potasio	Cromatógrafo de iones
Calcio	Espectrofotómetro de absorción
Magnesio	Espectrofotómetro de absorción

Referencia: APHA, AWWA, WEF, 1998

3.4 Aplicación de láminas de riego y análisis de lixiviados.

En esta sección se describen los aspectos considerados para definir los tratamientos utilizados en este estudio. Para el experimento se emplearon tres láminas de riego. La primera de ellas simuló la aplicada en el Valle de Tula, la cual de acuerdo con la CNA, 2005 es de 26 cm/riego. La tercera lámina de riego se determinó a partir de la evapotranspiración del cultivo y la necesidad de lavado de las sales, tal como se explica más adelante. Finalmente, la segunda lámina se consideró como una intermedia entre la lámina aplicada y la calculada.

3.4.1 Cálculo de la lámina de riego

La lámina calculada de riego para aplicar al cultivo de alfalfa, bajo las condiciones del Valle de Tula se determinó con base en la evapotranspiración y las necesidades de lavado de sales del suelo, de acuerdo con Palacios (1981) y Contreras y Martínez (1986).

3.4.1.1 Determinación de la evapotranspiración (EVT).

La evapotranspiración (EVT) se determinó por el método de Blanney y Criddle (Anexo 1) de acuerdo con Palacios (1981). En este método la evapotranspiración potencial se calcula en función de la temperatura media mensual y del porcentaje de horas luz del mes, con respecto al total anual. Las temperaturas promedio para cada mes se obtuvieron con los datos de temperatura de diez años correspondientes al periodo 1988-1998, los cuales se tomaron del programa “Información de 322 estaciones climatológicas de referencia, DAT 322 Versión 1.0” (IMTA y CNA, 2000). Es importante señalar que estos datos son los del poblado Tezontepec, ubicado en las coordenadas 20° 11” de latitud norte y 99° 16” de latitud oeste por ser el sitio más cercano a Atitalaquia que cuenta con datos climatológicos en dicha base de datos. El cálculo desarrollado se encuentra en el anexo 1.a.

3.5 Determinación de las necesidades de lavado

Las necesidades de lavado se determinaron de acuerdo con Richards (1954), con base en la conductividad eléctrica del agua de riego con respecto a la conductividad del agua de drenaje, bajo la cual el cultivo es capaz de dar buenos rendimientos.

El cultivo de alfalfa es una especie sensible a la salinidad (INFOAGRO, 2004). Por lo anterior, el valor de la conductividad eléctrica de la solución del suelo (en el cual el cultivo de alfalfa es capaz de dar buenos rendimientos) debe mantenerse por debajo de 4mS/cm de acuerdo con Richards, 1954. La conductividad eléctrica del agua residual cruda y del agua residual parcialmente tratada medida en campo fue en promedio de 1.5 ± 0.1 mS/cm.

Al sustituir en la ecuación 2 se obtiene

$$NL = 1.5 \text{ mS/cm} / 4 \text{ mS/cm}$$

$$NL = 37\%$$

Ecuación (3)

Por lo tanto, el volumen de agua necesario para el lavado de sales de los suelos a niveles adecuados para el crecimiento del cultivo de alfalfa fue del 37% de agua adicional a lo requerida para las funciones de evapotranspiración de la planta.

Finalmente, la lámina de riego calculada se determinó mediante la suma de la EVT total y el por ciento de agua requerida para el lavado de sales. El resultado fue de 94 cm para un ciclo de cultivo de 6 meses. Al sustituir en la ecuación 1 se obtiene

$$LR = 69\text{cm} + (69\text{cm} * 0.37)$$

$$LR = 94 \text{ cm}$$

Ecuación (4)

El agua de riego empleada constituyó otro factor del diseño experimental, se consideraron dos tipos de agua residual que fueron agua residual cruda (ARC) y agua residual parcialmente tratada (ARP). Con lo anterior se especificaron los tratamientos, del experimento que quedaron de la siguiente manera:

Tabla 3.4. Tratamientos empleados

	Factor 1	Factor 2
Tratamiento	Lámina de riego (cm)	Calidad del agua residual
Lámina aplicada en el Valle (LA)	26	cruda
		parcialmente tratada
Lámina media propuesta (LM)	20	cruda
		parcialmente tratada
Lámina calculada (LC)	15	cruda
		parcialmente tratada

El tratamiento Lámina Aplicada (LA) se refiere a la comúnmente empleada en el Valle, la Lámina Media (LC) se consideró como un valor intermedio entre la lámina aplicada y la lámina calculada y finalmente la Lámina Calculada (LC) se determinó, como se describió anteriormente con base en la evapotranspiración del cultivo de la alfalfa y las necesidades de lavado de sales de los suelos.

3.6 Análisis de lixiviados.

Los parámetros empleados para caracterizar los lixiviados fueron los mismos que para las aguas residuales presentados en la Tabla 3.3

3.7 Características de la semilla de alfalfa empleada

La especie vegetal empleada fue alfalfa (*Medicago sativa*), variedad: Atlixco de categoría certificada, con un porcentaje de germinación del 85% la cual es producida en: IDAHO, U.S.A. La densidad de siembra en cada maceta fue de 0.0704 g de semilla /columna. Las características generales de esta especie son: porte alto, tallos gruesos y hojas angostas, resistente a enfermedades radiculares causadas por hongos. Las características de uso óptimo son: recomendada para otoño-invierno para el centro y norte de México.

3.7.1 Determinación del desarrollo vegetativo de la alfalfa.

La determinación del desarrollo vegetativo de la alfalfa se realizó midiendo variables de rendimiento como el peso fresco y seco, al final del experimento. El peso fresco se

determinó inmediatamente después de su corte pesando el tejido de alfalfa en una balanza analítica. Para la determinación del peso seco se colocó el tejido en la estufa a 60°C durante 24 horas para posteriormente determinarse el peso seco, también con la ayuda de una balanza analítica.

3.7.2 Determinación de macro y micronutrientes en tejidos de alfalfa.

En el tejido de alfalfa se determinó el contenido de C y N total usando un analizador elemental, así como la concentración de S, Ca, K, Mg, Na, Mn, Fe, Zn, P, Cr y Cu, mediante fluorescencia de rayos X. Estos análisis se realizaron con el apoyo del Departamento de Geoquímica del Instituto de Geología de la UNAM.

3.8 Caracterización final del suelo

La Tabla 3.5 muestra los parámetros adicionales de caracterización del suelo al final del experimento.

Tabla 3.5 Parámetros adicionales de caracterización del suelo al final del experimento

Sales solubles (extracto acuoso 1:2.5)	Equipo de medición	Referencia
sodio	Cromatógrafo de iones	-
potasio	Cromatógrafo de iones	-
calcio	Espectro de absorción atómica	NOM-021-RECNAT-2000
magnesio	Espectro de absorción atómica	NOM-021-RECNAT-2000
cloruros	Cromatógrafo de iones	-
nitratos	Cromatógrafo de iones	-
sulfatos	Cromatógrafo de iones	-

Además de los parámetros señalados en la Tabla 3.1, al final del experimento se determinaron también las sales solubles contenidas en el suelo. Los extractos acuosos se obtuvieron empleando una relación de suelo:agua 1:2.5, es decir 10 g de suelo en 25 ml de agua destilada. Se agitaron durante 18 horas, posteriormente se permitió sedimentar y

se extrajo el sobrenadante en el cual se determinaron las sales. Dicho sobrenadante se filtró por 0.22 micras para el análisis por cromatografía de iones.

La importancia de la determinación del calcio, el magnesio y el sodio es debido a que son los cationes que mayoritariamente se unen a los cloruros y a los sulfatos para formar las sales, con menor frecuencia se encuentra el potasio y los nitratos, aunque estos últimos son de importancia porque forman sales tóxicas para los cultivos.

3.9 Análisis estadístico de los datos.

El análisis estadístico de los datos para evaluar las diferencias entre las láminas de riego en los dos tipos de agua residual se hizo mediante un análisis de varianza (ANDEVA) para un diseño factorial 2 x 3. Cuando se encontraron diferencias significativas, se realizó la comparación de medias. Esto se hizo con la prueba de Duncan con un $\alpha=0.05$. Se utilizó el programa estadístico SAS.

CAPITULO 4 Resultados y discusión

4.1 Caracterización inicial del suelo

La Tabla 4.1 muestra los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica del suelo al inicio del experimento, en comparación con los valores reportados para suelo de tipo feozem, en áreas cercanas, por Muñoz (1999) (densidad aparente, pH y materia orgánica) y Siebe (1995) (Nitrógeno Total (NT), fósforo Olsen y conductividad eléctrica).

El suelo empleado en el presente experimento es de tipo arcilloso. En la clase textural, la fracción dominante es la arcilla (40%). La conductividad eléctrica en la solución del suelo de una mezcla de suelo-agua 1:2.5 fue de 1.04. Esto nos da una medida indirecta del contenido de sales. Acorde con lo reportado en la NOM-021-RECNAT-2000, el suelo es medianamente alcalino, lo cual es importante en términos de la disponibilidad de nutrimentos para las plantas debido a que en dependencia del pH, disminuye o aumenta dicha disponibilidad. Además, el suelo tiene contenido alto de nitrógeno, fósforo disponible y materia orgánica.

Tabla 4.1 Caracterización fisicoquímica del suelo al inicio del experimento, con respecto a lo reportado en la literatura

Parámetro	Valor en esta tesis	Valor en la literatura *
Densidad aparente	1.1	1.09-1.12
pH relación 1:2,5 en agua	7.7	7.76-8.43
Materia orgánica (%)	5.7	2.10-7.61
Conductividad eléctrica (mS/cm) solución del suelo relación 1:2,5)	1.04	0.75
Textura	arcillosa	franco-arenosa a franco-arcillosa
Nitrógeno Total (%)	0.33	0.2
P olsen (ppm)	73	44

* Valores reportados por otros autores para suelos similares en la zona.

4.2 Caracterización del agua residual

En la Tabla 4.2 se muestran los promedios de cinco y diez repeticiones (iones y conductividad eléctrica y DQO, respectivamente) los resultados de la caracterización del agua residual cruda y agua residual parcialmente tratada.

La calidad de ambos tipos de agua residual empleada en el experimento, de acuerdo con Richards, (1954) se clasifica como C3-S1 que corresponde a agua altamente salina y marginalmente sódica, con un RAS = 9.69 y el PSI = 11%. La DQO total del agua residual cruda, resultó tres veces mayor que la del agua residual parcialmente tratada. Lo anterior se atribuye a que durante el almacenamiento del agua residual en la Presa Endhó, ésta funciona como una especie de tratamiento primario (sedimentación) en donde se remueve aproximadamente el 70% de materia orgánica. La DQO soluble fue 30% de la DQO total para el agua residual cruda y 65% para agua residual parcialmente tratada.

Tabla 4.2 Caracterización de los dos tipos de agua residual empleada ARC: Agua Residual Cruda y ARP: Agua Residual Parcialmente tratada.

Parámetros	ARC	ARP
CE (mS/cm)	1.61±0.2	1.4±0.2
DQO total (mg/L)	440±100	136±25
DQO soluble (mg/L)	115±5	49±3
NTK (mg/L)	50±5	25±2
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	28±3	19±3
N-NO ₂ ⁻ (mg/L)	ND	1.52±0.6
N-NO ₃ ⁻ (mg/L)	ND	5±0.7
P-PO ₄ ⁻³ (mg/L)	22±1.3	12±0.7
Na ⁺ (mg/L)	65±4	57±1
K ⁺ (mg/L)	8.2±5	24±3
Ca ⁺² (mg/L)	59±8	66±12
Mg ⁺² (mg/L)	32±6	28±9
Cl ⁻ (mg/L)	134±20	110±17

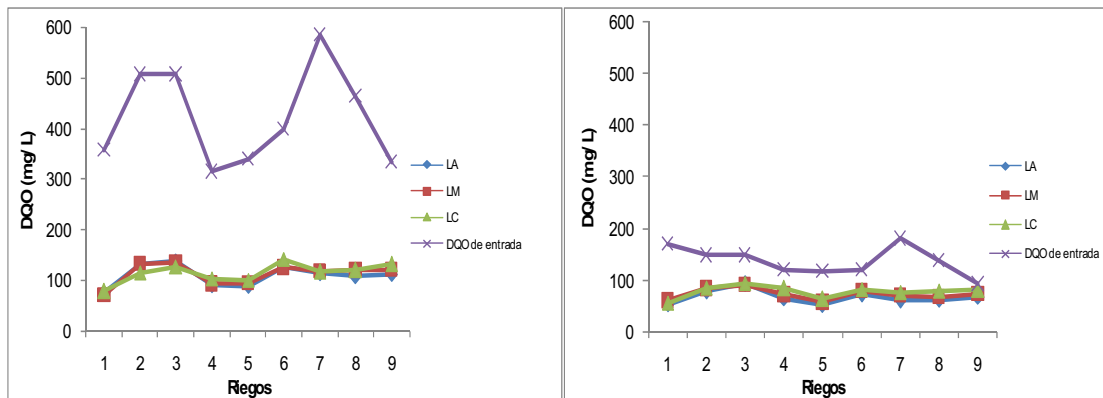
La concentración de los nutrientes (NTK, NH₄ y P- PO₄) fue la mitad en contenido para agua residual parcialmente tratada con respecto al agua residual cruda. Lo anterior, de acuerdo con Jiménez *et al.*, 2004 se debe a que en la presa Endhó, el nitrógeno y el fósforo es removido por el lirio acuático. Además no se detectaron nitritos y nitratos en el agua residual cruda, dada la nula cantidad de oxígeno disuelto existente. En cambio,

se observaron cantidades muy pequeñas en el agua residual parcialmente tratada. En relación con las sales, la composición de los dos tipos de agua residual resultó similar. No obstante, el sodio, cloruro y potasio resultaron mayores en el agua residual cruda que en el agua residual parcialmente tratada. Por su parte, el calcio y el magnesio se encontraron en una mayor concentración en el agua residual parcialmente tratada, proveniente de la Presa Endhó. Lo anterior puede atribuirse a las descargas en la Presa Endhó de agua de enfriamiento proveniente de la estación de Comisión Federal de Electricidad en Tula. Dicha agua arrastra consigo cantidades considerables de sarro de calcio y magnesio, proveniente de las incrustaciones en las torres de enfriamiento.

4.3 Análisis de lixiviados

4.3.1 Materia orgánica

La Figura 4.1 muestra la concentración de materia orgánica medida como DQO total presente en los lixiviados, con respecto a la DQO total de entrada del agua residual a lo largo del experimento para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.



ARC: Agua Residual Cruda ARP: Agua Residual parcialmente tratada
 LA: Lámina Aplicada LM: Lámina Media LC: Lámina calculada

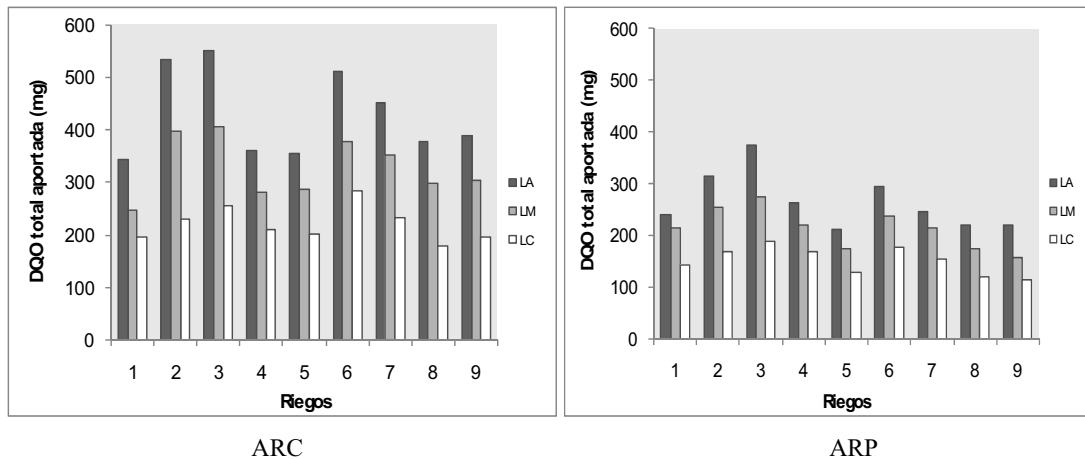
Figura 4.1 Concentración de DQO total en los lixiviados, con respecto a la DQO total de entrada del agua residual a lo largo de los riegos para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.

La remoción de la DQO total, al paso del agua residual por la columna de suelo, osciló ligeramente en todos los tratamientos. Para el agua residual cruda esto fue entre el 75 y 80%, mientras que para el agua residual parcialmente tratada entre 65 y 70% a lo largo del experimento.

A pesar de que se introdujeron diferentes cantidades de materia orgánica al suelo, dado por la variación de la calidad del agua residual a lo largo del experimento, las eficiencias de remoción se mantuvieron relativamente estables, siendo el suelo un sistema eficiente y estable para remover materia orgánica. Lo anterior coincide con lo señalado por Chung *et al.* (2004), quienes demostraron mediante el empleo de una técnica de filtración (usando suelo), que por un lado, la remoción más intensa de materia orgánica se realiza en los primeros 5 cm y continúa hasta los 40 cm del suelo, y por otro, que las eficiencias de remoción, que fueron del 70%, se mantuvieron constantes aunque se varió el flujo y la cantidad de materia orgánica del agua.

4.3.1.1 Aporte de materia orgánica por los lixiviados

La Figura 4.2 muestra la cantidad total de materia orgánica, medida como DQO total, aportada por los lixiviados para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego a lo largo del experimento.



ARC: Agua Residual Cruda ARP: Agua Residual parcialmente tratada
 LA: Lámina Aplicada LM: Lámina Media LC: Lámina calculada

Figura 4.2 DQO total (mg) aportada por los lixiviados para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.

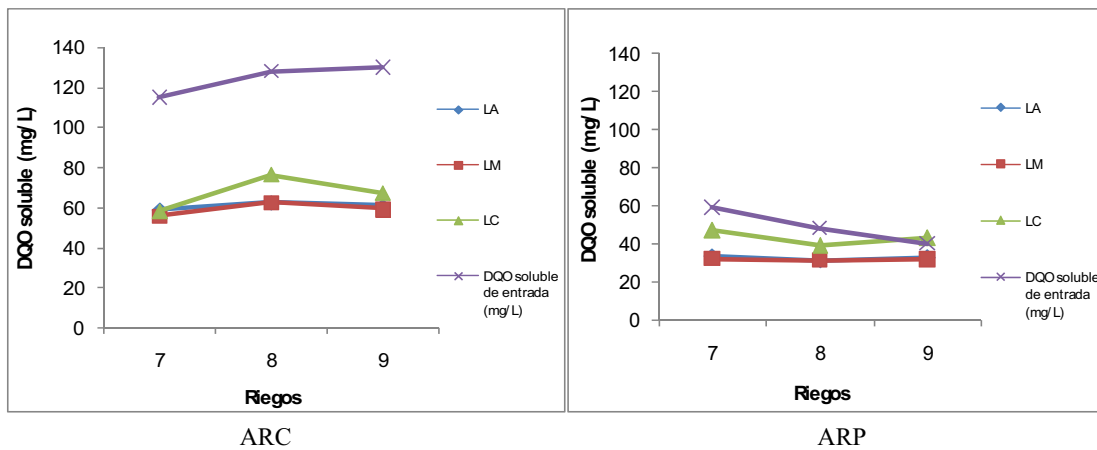
Con el empleo de agua residual cruda, el aporte de materia orgánica medida como DQO total por los lixiviados, fue 40% más con respecto a la cantidad aportada cuando se empleó agua residual parcialmente tratada.

Al comparar las láminas de riego con agua residual cruda, la lámina media aportó, en promedio, 24% menos de materia orgánica, medida como DQO total, en comparación con la lámina aplicada. La lámina calculada disminuyó dicho aporte en un 49%. Para el agua residual parcialmente tratada la lámina media aportó en promedio un 20% menos de materia orgánica respecto de la lámina aplicada, mientras que al usar la lámina calculada dicho aporte decreció hasta en un 43%.

4.3.2 Remoción de la DQO soluble

La Figura 4.3 muestra la cantidad total de materia orgánica, medida como DQO soluble, aportada por los lixiviados para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego a lo largo del experimento.

La fracción de DQO soluble presente en el agua residual fue del 45% para el agua residual cruda y del 51% para el agua residual parcialmente tratada, respecto de la DQO total.



ARC: Agua Residual Cruda ARP: Agua Residual parcialmente tratada
 LA: Lámina Aplicada LM: Lámina Media LC: Lámina calculada

Figura 4.3 Concentración de DQO soluble en los lixiviados, con respecto a la DQO soluble aportada por el agua residual a lo largo de los riegos para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.

La remoción de la DQO soluble, al paso del agua residual por la columna de suelo, se encontró para todas las láminas con agua residual cruda en 50%. Mientras que para el agua residual parcialmente tratada dicha remoción fue menor y se encontró entre el 20 y 40%. Lo anterior coincide con lo reportado por Herre (2004), quien evaluó en columnas

empacadas de suelo el efecto de emplear agua tratada sobre la lixiviación de carbono orgánico disuelto. Los resultados de dicho experimento mostraron que la cantidad de carbono orgánico disuelto en los lixiviados disminuyó conforme la calidad del agua mejoró, reflejando las diferencias en la entrada de carbono entre el agua residual cruda y el agua residual tratada. Sin embargo, cuando se empleó agua residual tratada la cantidad de carbono en el agua residual y en el lixiviado obtenido fue muy parecida, con eficiencias de remoción no mayores al 20%. Esto se atribuye, a que el empleo de agua residual tratada disminuye la entrada de materia orgánica disuelta y particulada a los suelos, causando un incremento en la mineralización de la materia orgánica como energía fácilmente disponible.

4.3.1.1 Aporte de materia orgánica por los lixiviados

La Figura 4.4 muestra la cantidad total de materia orgánica, medida como DQO soluble, aportada por los lixiviados para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego a lo largo del experimento.

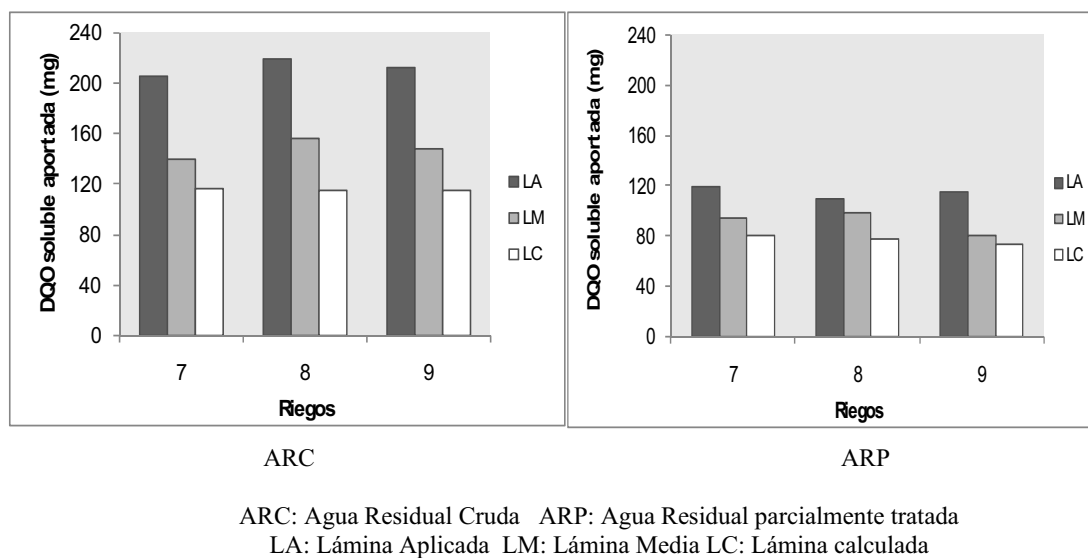


Figura 4.4 Cantidad total de materia orgánica, medida como DQO soluble aportada por los lixiviados para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego a lo largo de los riegos.

Con el agua residual cruda el aporte de materia orgánica medida como DQO soluble por los lixiviados, fue del 50% más que cuando se empleó agua residual parcialmente tratada.

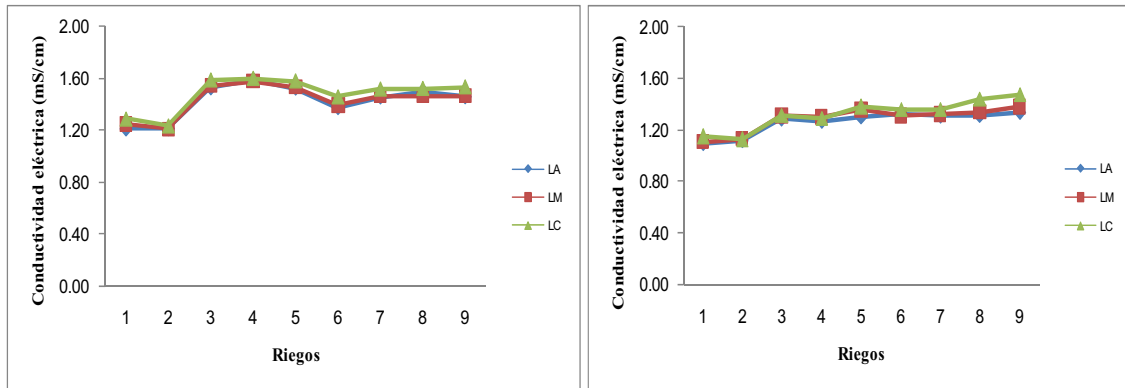
Al comparar las láminas, para el agua residual cruda, la lámina media disminuyó el aporte de materia orgánica, medida como DQO soluble, en un 32% con respecto al uso de la lámina aplicada. Con el empleo de la lámina calculada se redujo en un 46%. Para el agua residual parcialmente tratada la lámina media aportó en promedio un 21% menos de materia orgánica que cuando se utilizó la lámina aplicada, mientras que al usar la lámina calculada dicho aporte decreció hasta en 31%. De acuerdo con Metcalf y Eddy, (1995), la porción de materia orgánica que no se remueve en el suelo, puede deberse a la presencia de compuestos orgánicos refractarios como son productos microbianos solubles, compuestos orgánicos sintéticos, entre otros. Además, conforme aumenta la profundidad del suelo la remoción de la materia orgánica es menor, debido a un decremento en la actividad microbiana por el agotamiento de oxígeno conforme descende en la columna de suelo. Esto, dado que la mayoría de los compuestos orgánicos degradables presentes en el agua residual ya sea soluble o insoluble son degradados de manera más completa y rápida bajo condiciones aerobias.

La importancia de la materia orgánica en las fuentes de abastecimiento, de acuerdo con Leenher *et al.* (2007), reside en el hecho de que a pesar de encontrar cantidades mínimas de sustancias húmicas, éstas son responsables de un incremento significativo de la formación de productos potencialmente tóxicos en el agua cuando se desinfecta con cloro.

En conclusión, con el empleo de agua residual parcialmente tratada la carga contaminante de materia orgánica medida como DQO total y soluble aportada por los lixiviados disminuyó considerablemente con respecto a cuando se usó agua residual cruda. Para los dos tipos de agua residual, al comparar entre las láminas de riego, la lámina calculada aportó la menor carga de materia orgánica en los lixiviados.

4.4 Comportamiento de la Conductividad Eléctrica

La Figura 4.5 muestra el valor promedio de la conductividad eléctrica de los lixiviados, a lo largo de los riegos para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.



ARC

ARP

ARC: Agua Residual Cruda ARP: Agua Residual parcialmente tratada
 LA: Lámina Aplicada LM: Lámina Media LC: Lámina calculada

Figura 4.5 Conductividad eléctrica (mS/cm) de los lixiviados a lo largo de los riegos para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.

El valor de la conductividad eléctrica de los lixiviados obtenidos empleando agua residual cruda fue mayor al valor obtenido empleando agua residual parcialmente tratada para las tres láminas de riego.

La conductividad eléctrica de los lixiviados obtenidos fue muy parecida a lo largo de todos los riegos para las diferentes láminas. Lo anterior, demostró que fue posible conseguir el mismo nivel de lavado de sales de los suelos empleando láminas de riego menores, pero con la ventaja de un menor aporte de sales al acuífero. Además, la disminución en la lámina de riego no tuvo consecuencias en la acumulación de sales en el suelo a lo largo del experimento. Esto, se debe a que al inicio del riego se lixivia la mayor cantidad de sales acumuladas en el suelo y la concentración de sales en la solución del suelo se mantiene a niveles adecuados para el desarrollo del cultivo.

4.5 Remoción de sales por el suelo

La Tabla 4.3 muestra la concentración promedio en mg/L de iones en los lixiviados obtenidos por las tres láminas de riego con respecto a la concentración encontrada en los dos tipos de agua residual.

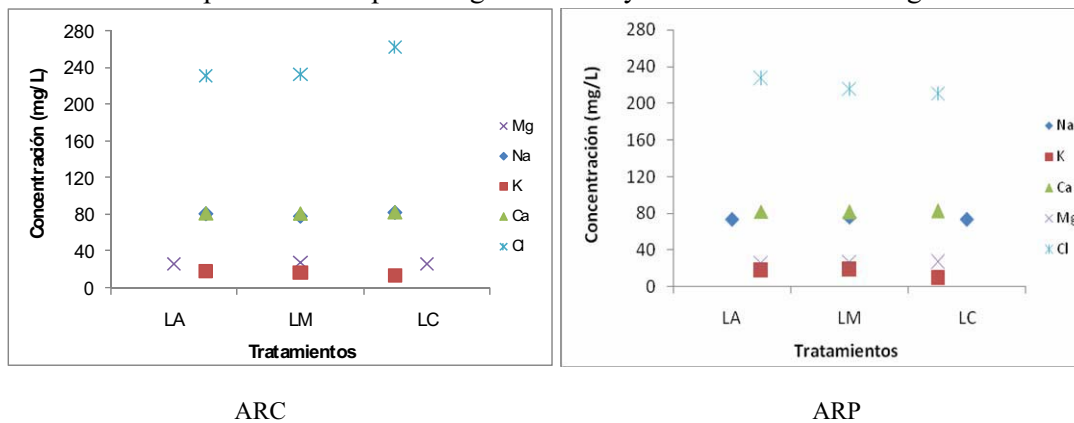
Tabla 4.3 Concentración promedio en mg/L de iones en los lixiviados obtenidos por las tres láminas de riego con respecto a la concentración encontrada en los dos tipos de agua residual.

	<i>Na</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Cl</i>
ARC	69±7	20±8	65±10	34±2	150±23
Lixiviados	81±11	18±6	81±12	27±3	232±30
ARP	56±5	23±3	68±12	30±8	114±8
Lixiviados	76±14	16±5	83±13	28±2	222±9

Los resultados demuestran que para los dos tipos de agua residual, tanto el agua de riego como el lixiviado obtenido con las tres láminas de riego tienen una concentración parecida de los iones analizados. Para sodio, calcio y cloruro la concentración fue mayor en los lixiviados que en el agua de riego, lo cual indica que éstos están siendo lavados del suelo. Esto se atribuye a que posterior al riego, las sales acumuladas se almacenan y concentran en la zona no saturada moviéndose a las aguas subterráneas en la siguiente irrigación (Suárez, 1989). Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por el BGS (1998), quien evaluó la influencia del riego con aguas residuales en aguas subterráneas del Valle de Tula. Los resultados del monitoreo de 21 sitios que incluían: 14 canales principales de irrigación y 7 drenes agrícolas mostraron que, ambas calidades de agua eran similares en concentración de los iones mayoritarios (Na^+ , Ca^{+2} , Cl^- , SO_4^{-2}). Para algunos puntos, el cloruro fue mayor en las aguas de drenaje con respecto al agua de los canales de riego.

4.5.1 Comportamiento de los iones

La Figura 4.6 muestra la concentración promedio obtenida a lo largo de los riegos de los iones analizados para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.



ARC: Agua Residual Cruda ARP: Agua Residual parcialmente tratada
 LA: Lámina Aplicada LM: Lámina Media LC: Lámina calculada

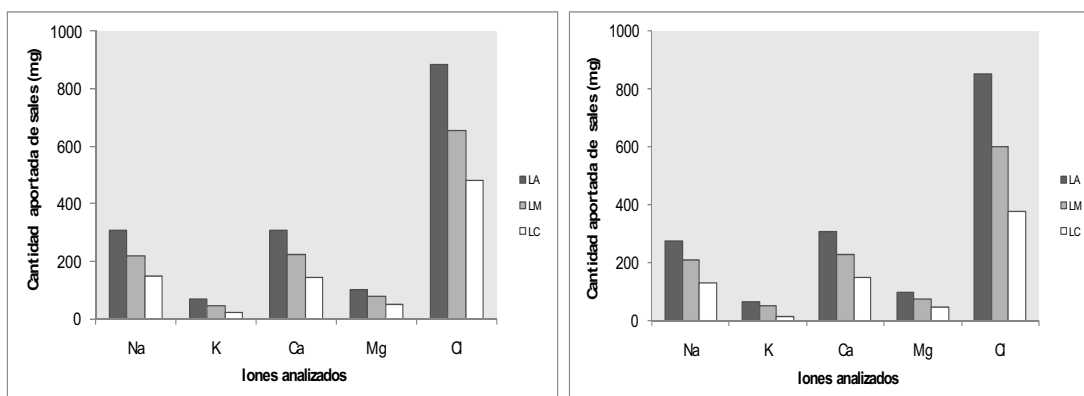
Figura 4.6 Concentración promedio obtenida a lo largo de los riegos de los iones analizados para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.

Las concentraciones promedio de los iones en las tres láminas de riego en cada tipo de agua residual se mantuvieron relativamente estables. No se encontró un efecto importante para la mayoría de los iones analizados, con excepción del cloruro, para el cual se observó un ligero incremento en la concentración en los lixiviados al emplear la lámina calculada con el agua residual cruda, lo cual indica una posible acumulación de este elemento en el suelo. La concentración de sodio y calcio se mantuvo a niveles muy parecidos entre ellos así como de potasio y magnesio en cada tipo de agua residual.

El contenido de sodio y cloruros está regulado en la NOM-172-SSA-1994 siendo el límite máximo permisible de estos iones en aguas de beber de 200 y 250 mg/L, respectivamente. En el presente experimento la concentración de sodio y cloruros en los lixiviados fue de 81 y 232 mg/L, respectivamente para el agua residual cruda mientras que para el agua residual parcialmente tratada fue de 76 y 222 mg/L para sodio y cloruros, respectivamente. Con lo anterior, es posible señalar que la concentración de cloruro presente en las fuentes de abastecimiento en el Valle de Tula podría encontrarse muy cerca del límite que señala la norma para el caso de los cloruros. Los cloruros no tienen efectos peligrosos para los humanos, pero concentraciones mayores a 250 mg/L dan un sabor salado al agua que es rechazado por las personas. Por lo anterior, su contenido se limita a la concentración anteriormente señalada en la norma de agua potable (Sawyer, 2000). Por otro lado, la concentración de calcio y magnesio, la cual está relacionada con la dureza del agua que de acuerdo con la NOM-127-SSA-1996 no debe exceder los 500 mg/L, no representa problema de acuerdo con los resultados obtenidos en este experimento. Esto, dado que la dureza de los lixiviados, determinada con base en el contenido de calcio y magnesio, fue de 76mg/L para el agua residual cruda y 80mg/L para el agua residual parcialmente tratada. Sin embargo, es importante considerar que el paso del agua después de los 30 cm de suelo continúa disolviendo calcio, con lo cual estos valores podrían incrementarse.

4.5.1.1 Aporte de sales.

La Figura 4.7 muestra la cantidad total promedio de sales aportada por los lixiviados para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego a lo largo del experimento.



ARC

ARP

ARC: Agua Residual Cruda ARP: Agua Residual parcialmente tratada
 LA: Lámina Aplicada LM: Lámina Media LC: Lámina calculada

Figura 4.7 Cantidad de sales (mg) aportada por los lixiviados para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.

El aporte de sales por los lixiviados fue mayor con el agua residual cruda para sodio, magnesio y cloruros en un 19, 12 y 24%, respectivamente, que cuando se usó agua residual parcialmente tratada. Por su parte el aporte de potasio y calcio fue mayor en un 13 y 4% respectivamente cuando se empleó agua residual parcialmente tratada con respecto al agua residual cruda. Respecto del calcio, esto puede atribuirse a que el agua residual parcialmente tratada presenta una mayor concentración de dicho elemento, debido a lo señalado en el apartado 4.2. Con respecto al potasio, esto puede explicarse debido a que se observó la acumulación de este elemento en la solución del suelo, dado por un posible efecto antagonista del calcio y el magnesio, y el subsecuente lavado de este elemento de la solución del suelo incrementó la concentración del mismo en los lixiviados.

Al comparar entre las láminas, para el agua residual cruda, la lámina media tuvo una disminución en el aporte de sales para sodio, potasio, calcio, magnesio y cloruros del 29%, 33%, 27%, 22% y 26%, respectivamente que con el uso de la lámina aplicada. Al igual que con el empleo de la lámina calculada con la cual la disminución fue del 51%, 65%, 52%, 52% y 45%, respectivamente. Para el agua residual parcialmente tratada el empleo de la lámina media disminuyó el aporte para el mismo orden de sales en un 23%, 24%, 25%, 23% y 29%, con respecto a cuando se utilizó la lámina aplicada, mientras que al usar la lámina calculada el aporte de sales disminuyó en 51%, 65%, 52%, 52% y 45%, respectivamente.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este experimento, existieron diferencias mínimas, en términos de aportación de sales, al comparar entre los dos tipos de agua residual, por lo que la depuración de las aguas residuales no resuelve el problema de las cargas de sales aportadas al acuífero y el posterior aumento en la concentración. No obstante, el empleo de la lámina calculada en los dos tipos de agua residual, aportó una menor cantidad de sales en los lixiviados, consiguiendo los mismos niveles de lavado de sales de los suelos.

Conclusión de los resultados obtenidos del análisis de lixiviados.

El suelo resultó un sistema estable y eficiente en la remoción de materia orgánica. El empleo de agua residual parcialmente tratada redujo la cantidad de materia orgánica aportada por los lixiviados en prácticamente la mitad con respecto al agua residual cruda. La reducción de la materia orgánica presente en los lixiviados cuando se empleó la lámina media osciló entre 25% y 30%, mientras que con la lámina calculada disminuyó entre 45% y 50%. Respecto de la conductividad eléctrica, el agua residual parcialmente tratada produjo valores más bajos de conductividad eléctrica en los lixiviados respecto del agua residual cruda. No se observaron diferencias en la conductividad eléctrica de los lixiviados obtenidos al emplear las tres láminas de riego en los dos tipos de agua residual, lo que implica que en todos los casos los niveles de lavado de sales de los suelos son muy similares. La concentración de sales en los lixiviados producidos con los dos tipos de agua residual fueron muy parecidos, pero el empleo de láminas menores de riego disminuyó la carga de sales aportada al acuífero.

4.7 Parámetros vegetativos de la Alfalfa

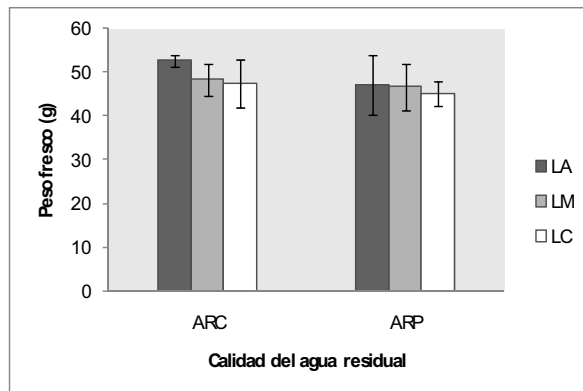
Se evaluó la productividad de la alfalfa en términos del peso fresco y seco para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego empleadas. Los resultados se muestran como promedio de cuatro repeticiones en las Figuras 4.8 y 4.9

4.7.1 Peso fresco del tejido de alfalfa

La Figura 4.8 muestra la productividad de la alfalfa medida como peso fresco en gramos para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.

La productividad en términos de peso fresco de todas las láminas de riego usando agua residual cruda fue, en términos numéricos, ligeramente mayor que la obtenida empleando agua residual parcialmente tratada.

Al comparar entre las láminas de riego para el agua residual cruda, la mayor productividad en términos de peso fresco, se obtuvo con la lámina aplicada cuyo valor fue de $52.6 \pm 0.7g$. Esta productividad disminuyó en un 8% ($48.3 \pm 1.9g$) con la lámina media y en un 11% ($47.4 \pm 2.8g$) con la lámina calculada. Respecto al uso del agua residual parcialmente tratada la lámina de riego más eficiente nuevamente fue la aplicada, cuya productividad en términos del peso fresco fue del $47.1 \pm 3g$. Dicha productividad disminuyó en un 1% ($46.8 \pm 1.4g$) cuando se empleó la lámina media y en un 4% ($45.2 \pm 2.6g$) con la lámina calculada.



ARC: Agua Residual Cruda ARP: Agua Residual Parcialmente tratada
 LA: Lámina Aplicada LM: Lámina Media LC: Lámina Calculada

Figura 4.8 Peso fresco del tejido de alfalfa para cada tratamiento y calidad del agua residual.

No obstante, a pesar de que se observó una tendencia a la disminución del peso fresco conforme se redujo la lámina de riego, estadísticamente no se observaron diferencias significativas en la productividad de la alfalfa, en términos de peso fresco, al comparar entre los dos tipos de agua residual empleada y entre las láminas de riego ($F=0.3472$, $gl=5, 23$).

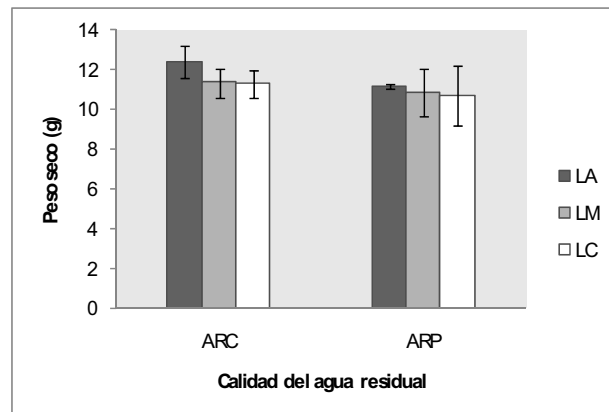
Es posible concluir, por tanto, que el empleo de agua residual parcialmente tratada permitió mantener la productividad de la alfalfa, en términos de peso fresco, en niveles parecidos a los obtenidos cuando se usó agua residual cruda. De igual manera, la productividad se mantuvo con el empleo de la lámina media y la lámina calculada con respecto a la lámina aplicada que actualmente se emplea en el Valle.

4.7.2 Peso seco del tejido de alfalfa

La Figura 4.9 muestra la productividad de la alfalfa medida como peso seco en gramos para las tres láminas de riego y los dos tipos de agua residual.

De igual manera que para el peso fresco, al comparar entre las láminas de riego para el agua residual cruda, la mayor productividad, en términos de peso seco, se obtuvo con la lámina aplicada cuyo valor fue de $12.37 \pm 0.8g$. Esta productividad disminuyó en un 8% ($11.35 \pm 0.7g$) cuando se usó la lámina media y en un 8.2% ($11.30 \pm 0.7g$) con la lámina calculada. Respecto al uso del agua residual parcialmente tratada, la lámina de riego más eficiente nuevamente fue la lámina aplicada, cuya productividad en términos del peso fresco fue de $11.2 \pm 0.1g$. Dicha productividad disminuyó en un 3% ($10.85 \pm 1.5g$) cuando se empleó la lámina media y en un 4% con el uso de la lámina calculada.

Nuevamente, a pesar de que se observó una reducción de los valores obtenidos de peso seco conforme se redujo la lámina de riego, el análisis estadístico reveló que no existieron diferencias significativas en la productividad de la alfalfa, en términos de peso seco, al comparar entre los dos tipos de agua residual empleada y entre las láminas de riego ($F=0.2154$, $g.l=5$, 23).



ARC: Agua Residual Cruda ARP: Agua Residual Parcialmente tratada
LA: Lámina Aplicada LM: Lámina Media LC: Lámina Calculada

Figura 4.9 Peso seco del tejido de alfalfa para cada tratamiento y calidad del agua residual

Reiteradamente, es posible concluir que el empleo de agua residual parcialmente tratada permitió mantener la productividad de la alfalfa, en términos de peso seco, en los mismos niveles obtenidos que cuando se usó agua residual cruda. Nuevamente, se

comprobó que el empleo de una lámina de riego menor (lámina media y lámina calculada) con respecto de la actualmente empleada (lámina aplicada) mantuvo la productividad en términos de peso seco del cultivo de alfalfa.

El mantenimiento de la productividad de la alfalfa, en términos de peso fresco y seco, a niveles muy parecidos para los dos tipos de agua residual empleados y las tres láminas de riego, comprueba lo mencionado por Siebe (1998), quien señala que las cantidades de macronutrientes N, P y K que entran a la alfalfa a través del riego con aguas residuales crudas son mayores a las removidas por la misma, siendo las cantidades recomendadas para ser aplicadas bajo las condiciones de riego del Valle de menos de la mitad. Además, menciona que el agua residual que sale de la presa Endhó corresponde de una manera más adecuada a los requerimientos de los cultivos dado que contiene una menor concentración de nutrientes respecto del agua residual cruda.

4.8 Relación entre el peso fresco y seco del tejido de alfalfa.

La relación peso seco: peso fresco, refleja la capacidad de los cultivos para producir materia seca cuando se modifican las condiciones de cultivo. Dichas condiciones pueden incluir: a) medios afectados por sales, b) condiciones de sequía, c) espacio para el crecimiento, entre otros (Zérega *et al.*, 1991). En el presente experimento se observó que la relación peso seco: peso fresco no se vio afectada ni por la variación de la calidad del agua residual, ni por la disminución de la lámina de riego, manteniéndose el mismo valor de la relación para todos los tratamientos el cual fue de 0.24. Este valor coincidió con las relaciones peso seco:peso fresco que se observan para el cultivo de alfalfa, en condiciones de campo en el Valle de Tula, las cuales se encuentran entre 0.21 y 0.24 a lo largo del año. Estos valores se obtuvieron con base en los valores mensuales de peso seco y peso fresco mencionados por González (2007).

El valor obtenido en este experimento, también coincide con lo reportado por Zérega *et al.*, 1991 quienes emplearon la relación peso seco:peso fresco para seleccionar preliminarmente a las variedades de caña de azúcar más tolerantes a dos suelos afectados por sales, así como determinar niveles críticos de sales que afectan el cultivo de la caña de azúcar. La mayoría de los genotipos evaluados mantuvieron valores similares de la relación peso seco /peso fresco en los dos suelos bajo estudio, los cuales

oscilaron entre 0.24 y 0.28, registrándose este último valor en dos de los genotipos altamente resistentes a las condiciones salinas.

4.9 Elementos mayores y traza en tejido de alfalfa

Se evaluó el contenido de elementos mayores y traza en tejido de alfalfa para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego empleadas. Los resultados se muestran como promedio de cuatro repeticiones en la Tabla 4.4.

4.9.1 Elementos mayores

La Tabla 4.4 muestra los valores promedio de elementos mayores y traza medidos en tejido de alfalfa, para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego, en comparación con los valores reportados por cuatro autores acerca de los niveles adecuados de elementos mayores y traza para el cultivo de alfalfa.

Tabla 4.4 Valores promedio de elementos mayores y traza medidos en tejido de alfalfa, para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego, en comparación con lo reportado en la literatura.

Elementos mayores y traza	ARC			ARP			Valores comparativos *			
	LA	LM	LC	LA	LM	LC	Bergmann(1986)	Siebe (1994)	Mils and Jones (1996)	García (1999)
N(%)	3.75±0.17	3.66±0.2	3.48±0.2	3.45±0.2	3.36±0.2	3.3±0.04	3.5-5	3.5-5.2	4.5-5	2.5-3
P(g/kg)	3±0.12	3±0.2	2.7±0.09	2.75±0.1	2.53±0.1	2.50±0.1	3.1-6.1	2.5-4.2	2.6-5	2.2-3.3
Cu(g/kg)	14.1±0.5	15.6±1.9	14.5±0.6	16.5±1.8	15.1±0.5	15.3±0.7	10-25	8-13	18-30	11-12.5
S(g/kg)	4.1±0.2	4.1±0.1	3.7±0.1	2.6±1.3	3±1.5	3±1.5	NE	NE	2.6-5	2.5-5
K(g/kg)	32±2.4	31±3.8	30±1.6	25±0.8	29±1.2	29±1	25-38	25-30	20-35	18-25
Mg(g/kg)	3.1±0.1	3.3±0	3.3±0.1	3.4±0.1	3.4±0.2	3.3±0.2	3-8	2-3.2	3-10	2-3.7
Na(g/kg)	4.2±0.5	4.4±1.1	4.4±0.4	4.4±1	4.4±0.4	4.3±0.2	NE	2-5	NE	NE
Mn(mg/kg)	97±17	101±7	106±3	108±11	109±9	110±11	30-100	NE	31-100	25
Fe(mg/kg)	675±85	857±147	1048±101	806±51	831±58	902±239	40-250	100-300	30-250	30-50
Zn(mg/kg)	185±33	185±88	172±10	162±26	155±13	148±3	25-70	30-40	21-70	15
Cu(mg/kg)	13.7±4.11	12.9±6.37	11±0.57	9.8±0.81	9.2±0.50	8.4±0.95	6-15	6-11	7-30	7

* Los valores comparativos corresponden para el caso de Siebe (1998) a datos obtenidos en parcelas de la zona de estudio, mientras que para el resto de los autores corresponden a niveles de suficiencia para el cultivo de alfalfa.

La alfalfa mostró un notable consumo de potasio, similar en cantidad a la absorción de nitrógeno. En segundo lugar, la alfalfa consumió calcio, lo cual es característico de la familia de las leguminosas. En tercer lugar, la alfalfa absorbió azufre y finalmente en cantidades muy parecidas absorbió fósforo y magnesio.

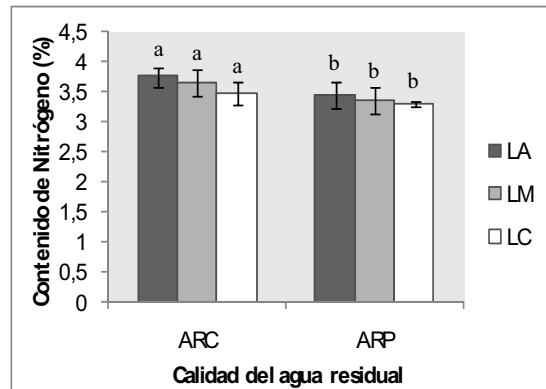
Al comparar entre los dos tipos de agua residual y las diferentes láminas de riego, los elementos mayores que mostraron diferencias estadísticamente significativas fueron nitrógeno, fósforo, potasio y azufre. No así el calcio y el magnesio.

4.9.1.1 Nitrógeno

La Figura 4.10 muestra el contenido de nitrógeno en porcentaje en el tejido de alfalfa para cada tratamiento y calidad del agua residual.

Estadísticamente, se encontró que el contenido de nitrógeno fue significativamente diferente y mayor en el tejido de alfalfa de todas las láminas de riego cuando se usó agua residual cruda con respecto al obtenido con agua residual parcialmente tratada ($F=0.0062$, $g.l=5$, 23).

Para el agua residual cruda, se observó que el mayor contenido de nitrógeno en el tejido se obtuvo con la lámina aplicada, sin embargo, éste no fue significativamente diferente del valor obtenido para la lámina media ni para la lámina calculada. El mismo comportamiento se observó cuando se usó agua residual parcialmente tratada.



ARC: Agua Residual Cruda ARP: Agua Residual Parcialmente tratada
LA: Lámina Aplicada LM: Lámina Media LC: Lámina Calculada

Figura 4.10 Contenido de nitrógeno en por ciento en el tejido de alfalfa para cada tratamiento y calidad del agua residual.

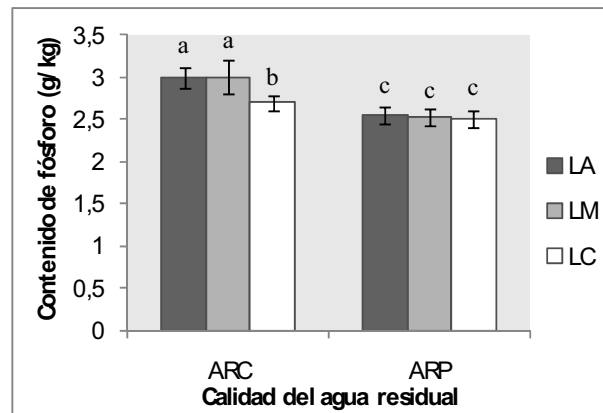
Al comparar los valores de nitrógeno en el tejido de alfalfa para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego con lo reportado en la literatura (Tabla 4.4), se observó que éstos se encontraron dentro del rango de lo reportado por Siebe (1994) y Bergmann (1986), solamente cuando se usó agua residual cruda para todas las láminas de riego, mientras que cuando se empleó agua residual parcialmente tratada estos valores fueron ligeramente más bajos, respecto de lo reportado por estos autores. Por su

parte, para los dos tipos de agua fueron menores que los reportados por Mils y Jones (1996). Finalmente se encontraron por encima de lo reportado por García (1999).

4.9.1.2 Fósforo

La Figura 4.11 muestra el contenido de fósforo en g/kg en el tejido de alfalfa para cada tratamiento y calidad del agua residual.

Estadísticamente, se observó que los valores de fósforo en tejido de alfalfa obtenidos para las tres láminas de riego cuando se usó agua residual cruda fueron significativamente diferentes de los valores obtenidos empleando agua residual parcialmente tratada ($F=0.0001$, $g.l=5, 23$).



ARC: Agua Residual Cruda ARP: Agua Residual Parcialmente tratada
 LA: Lámina Aplicada LM: Lámina Media LC: Lámina Calculada

Figura 4.11 Contenido de fósforo g/kg en el tejido de alfalfa para cada tratamiento y calidad del agua residual.

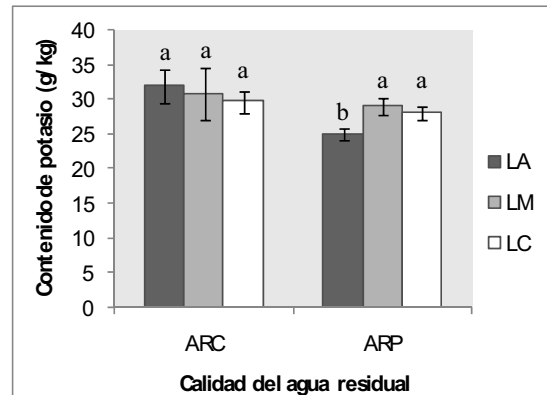
Al comparar entre los valores obtenidos con las tres láminas de riego empleando agua residual cruda, se observó que el contenido más elevado de fósforo en el tejido se obtuvo cuando se usó la lámina aplicada y la lámina media, cuyos valores fueron iguales (3 ± 0.2). No se observaron diferencias significativas entre estas láminas. Sin embargo, sí se encontraron diferencias significativas entre estas dos láminas y la lámina calculada que tuvo el valor más bajo el cual fue de 2.7 ± 0.1 g/kg. Para el agua residual parcialmente tratada, nuevamente el valor más alto se registró con el empleo de la lámina aplicada. Sin embargo, este valor no fue significativamente diferente cuando se comparó con el obtenido para la lámina media y la lámina calculada.

El contenido de fósforo en el tejido de alfalfa para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego por su parte, se ubicó dentro del rango reportado por Siebe (1994), Mils y Jones (1996) y García (1999) para las dos calidades de agua residual. Se observó ligeramente debajo de lo señalado por Bergmann (1986).

4.9.1.3 Potasio

La Figura 4.12 muestra el contenido de potasio mg/kg en el tejido de alfalfa para cada tratamiento y calidad del agua residual.

Para el potasio, estadísticamente sólo se observaron diferencias significativas entre la lámina aplicada con el agua residual parcialmente tratada, que mostró el valor más pequeño con el resto de las láminas en los dos tipos de agua residual ($F=0.0166$, $g.l=5$, 23). Este comportamiento puede atribuirse a un efecto antagonista del calcio y el magnesio sobre el potasio, cuyo valor en la solución del suelo para esta lámina de riego fue mayor y en consecuencia hubo competencia del potasio con los sitios de absorción del calcio y el magnesio.



ARC: Agua Residual Cruda ARP: Agua Residual Parcialmente tratada
 LA: Lámina Aplicada LM: Lámina Media LC: Lámina Calculada

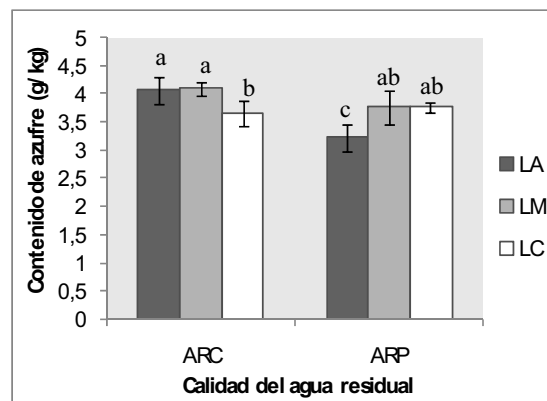
Figura 4.12 Contenido de potasio en mg/kg en el tejido de alfalfa para cada tratamiento y calidad del agua residual.

El contenido de potasio de la planta en este experimento para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego se encontró ligeramente arriba de lo señalado por Siebe (1994) y García (1999), y dentro de los rangos reportados por Bergmann (1986) y Mils y Jones (1996).

4.9.1.4 Azufre

La Figura 4.13 muestra el contenido de azufre en mg/kg en el tejido de alfalfa para cada tratamiento y calidad del agua residual.

Estadísticamente, el contenido de azufre en el tejido de alfalfa mostró diferencias significativas cuando se comparó entre los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego. Al comparar entre las láminas de riego con agua residual cruda se observaron diferencias entre la lámina aplicada y la lámina media, con respecto a la lámina calculada cuyo valor fue el más pequeño.



ARC: Agua Residual Cruda ARP: Agua Residual Parcialmente tratada
LA: Lámina Aplicada LM: Lámina Media LC: Lámina Calculada

Figura 4.13 Contenido de azufre en mg/kg en el tejido de alfalfa para cada tratamiento y calidad del agua residual.

Además, estas tres láminas fueron diferentes de la lámina aplicada con agua residual parcialmente tratada. Para el caso del agua residual parcialmente tratada, se observaron diferencias entre la lámina aplicada con respecto a la lámina media y la lámina calculada, no así entre estas últimas.

El contenido de azufre en el tejido de alfalfa para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego se encontró dentro del rango que señalan todos los autores de la tabla 4.4

4.9.1.5 Calcio

Para el contenido de calcio en el tejido de alfalfa, no se encontraron diferencias significativas al comparar entre los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego

($F=0.2220$, $g.l=5$, 23). Esto, se atribuye a que el suelo tiene un contenido importante de calcio como lo muestra el pH, por lo cual no resulta limitante y, a pesar de que se reduzca el contenido de calcio aportado por el agua residual al disminuir las láminas de riego, no se observan efectos en la concentración del mismo en la solución de suelo y en consecuencia de su absorción por la alfalfa. El contenido de calcio en los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego obtenido en este experimento, fue mayor a lo señalado por Siebe (1994). Lo anterior, se atribuye a que la edad del suelo en el que se desarrolló el cultivo de alfalfa mencionado por esta autora tiene 80 años bajo riego por lo que el sodio ha desplazado al calcio de los sitios de intercambio absorbiéndose en consecuencia más sodio. Por su parte, se ubicó dentro de los rangos mencionados por Bergmann (1986). Se observó por debajo de lo reportado por Mils y Jones (1996) y por encima de lo señalado por García (1999).

4.9.1.6 Magnesio

De igual manera que para el calcio no se encontraron diferencias significativas en el contenido de magnesio en el tejido de la alfalfa al comparar entre los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego ($F=0.2654$, $g.l=5$, 23).

El contenido de magnesio en los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego obtenido en este experimento se encontró dentro del rango mencionado por todos los autores.

4.9.2 Relación N:S

INTA (2004), señaló que el contenido de azufre es un elemento de gran importancia en suelos cultivados con alfalfa, debido a su estrecha relación con el nitrógeno para la formación de aminoácidos (particularmente la metionina y la cistina) en la pastura, además de que su demanda guarda relación con los niveles de producción de materia seca.

La relación N:S en el tejido de alfalfa obtenida en el presente experimento fue similar al comparar entre los dos tipos de agua residual y entre las distintas láminas de riego aplicada, ubicándose entre 9:1 y 10:1.

La relación N:S en tejido vegetal óptima para la nutrición de los rumiantes se ha ubicado de manera general entre 10:1 y 15:1. NRC (1985) encontró que la relación N:S

en el alimento de ovejas adultas no debía ser mayor a 10. Por su parte, Metson (1973) señaló que la relación N:S óptima para los pastos se encontraba entre 14 y 16. Al igual que la reportada Blake Kalff *et al.* (2000) quien señaló que para el cultivo de trigo las relaciones críticas N:S en hoja son de 15:1

De acuerdo a lo reportado con la literatura, con el empleo de los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego, el cultivo de alfalfa en el presente experimento presentó una relación adecuada de N:S.

4.10 Sodio

Estadísticamente, no se observaron diferencias significativas al comparar el contenido de sodio en el tejido de alfalfa entre los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego ($F=0.9235$, $g.l=5$, 23).

El sodio no es considerado un elemento de interés para el cultivo de alfalfa. No obstante, dado que este elemento se encontró en cantidades importantes en el agua de riego, el tejido de alfalfa absorbió sodio en cantidades mayores incluso al fósforo y parecidas al azufre, ambos elementos esenciales para el cultivo de alfalfa. Sin embargo, estos niveles aun no causan daños en la productividad del cultivo de alfalfa debido a que, para que el sodio tenga un efecto de toxicidad el contenido de este elemento debe ser mayor al 2% (Niborsky, 2000) y en el presente experimento fue del 0.4%. Los valores obtenidos se encontraron en el rango de lo reportado por Siebe (1994).

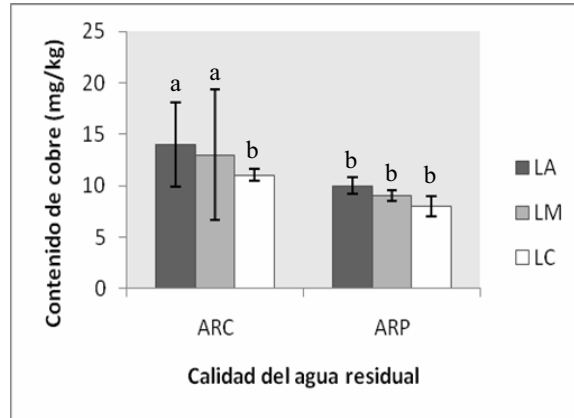
4.11 Micronutrientes.

De los micronutrientes, la alfalfa mostró un notable consumo de hierro. En segundo lugar, la alfalfa absorbió zinc seguido de manganeso y finalmente cobre.

Estadísticamente, al comparar entre los dos tipos de agua residual y las diferentes láminas de riego, el único elemento que mostró diferencias significativas fue el cobre ($F=0.0011$, $g.l=5$, 23). En cambio, no se encontraron diferencias significativas para el hierro ($F=0.1897$, $g.l=5$, 23), zinc ($F=0.0529$, $g.l=5$, 23) y manganeso ($F=0.0867$, $g.l=5$, 23).

4.11.1 Cobre

La Figura 4.14 muestra el contenido de cobre en mg/kg en el tejido de alfalfa para cada tratamiento y calidad del agua residual.



ARC: Agua Residual Cruda ARP: Agua Residual Parcialmente tratada
LA: Lámina Aplicada LM: Lámina Media LC: Lámina Calculada

Figura 4.14 Contenido de cobre en mg/kg en el tejido de alfalfa para cada tratamiento y calidad del agua residual.

El contenido de cobre en el tejido de alfalfa fue mayor con las tres láminas de riego cuando se usó agua residual cruda que cuando se empleó agua residual parcialmente tratada.

Al cotejar entre las láminas de riego con agua residual cruda, se observó que existieron diferencias significativas entre la lámina aplicada y la lámina media con respecto a la lámina calculada. Para el agua residual parcialmente tratada no se observaron diferencias significativas entre las láminas de riego.

El contenido de cobre en los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego, se encontró dentro del rango mencionado por Bergmann (1986) y Mils y Jones (1996). Con respecto a lo reportado por Siebe (1994), los valores obtenidos con la lámina calculada para agua residual cruda y todos los valores obtenidos con el empleo de agua residual parcialmente tratada se encontraron en el rango, mientras que la lámina aplicada y la lámina media con agua residual cruda fueron ligeramente mayores. Además, los valores obtenidos para todas las láminas fueron mayores a lo reportado por García (1999).

4.11.2 Hierro, manganeso y zinc

El contenido de hierro y manganeso en el tejido de alfalfa, aumentó conforme disminuyó la lámina de riego para los dos tipos de agua residual. Por su parte, el contenido de zinc disminuyó conforme la lámina de riego fue menor. No obstante, estas diferencias no resultaron significativas. El contenido de manganeso, zinc y hierro resultó mayor a lo reportado por los autores en la literatura. Para el manganeso, los valores obtenidos en este experimento fueron solo ligeramente mayores. Con respecto al zinc, fueron dos veces mayor. Mientras que el hierro resultó tres veces mayor que lo señalado en la literatura mencionada en la tabla 4.4.

Un contenido excesivo de elementos traza en tejido de alfalfa puede atribuirse a la presencia de estos micronutrientes en el agua de riego y al hecho de que más del 85% de elementos traza presentes en el agua de riego suelen acumularse en el suelo aumentando su concentración debido a las reacciones que se producen con otros elementos químicos que forman los complejos estructurales del suelo pudiendo alcanzar niveles tóxicos.

Conclusión del contenido de macronutrientes y elementos traza en tejido de alfalfa.

De acuerdo con el análisis anterior acerca del contenido de macronutrientes en tejido de alfalfa, es posible decir que con el empleo de los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego, se consiguió el aporte adecuado de la mayoría de los macronutrientes para el cultivo de alfalfa, dado que los niveles encontrados se mantuvieron dentro de los intervalos que se consideran adecuados en la literatura. Esto, con excepción del nitrógeno, para todas las láminas de riego cuando se empleó agua residual parcialmente tratada en el cual se encontró ligeramente por debajo de los límites reportados por la mayoría de los autores. Lo anterior, implica que el empleo de agua residual parcialmente podría requerir, aunque en mínimas cantidades, de una fertilización nitrogenada adicional o de la revisión de la simbiosis con bacterias fijadoras de nitrógeno. Respecto a los micronutrientes, y con excepción del cobre, éstos se encontraron en niveles mayores que lo reportado en la literatura para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego. Lo anterior, dado por la presencia de los micronutrientes en las aguas de riego y su capacidad de acumulación en el suelo.

4.12 Variación en los contenidos de nutrientes, materia orgánica y sales del suelo

La Tabla 4.5 muestra los valores promedio obtenidos al final del experimento, para el contenido de nutrientes (nitrógeno total y fósforo disponible), materia orgánica y conductividad eléctrica en el suelo para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego, en comparación con los valores obtenidos de la caracterización inicial del suelo.

Al comparar el suelo al inicio y al final del experimento, en términos de nutrientes y materia orgánica, se observó que el contenido de nitrógeno en el suelo se mantuvo en los mismos niveles que al inicio del experimento para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego. De manera contraria, se observó una importante reducción en el contenido de P disponible. La tasa de mineralización con el empleo de agua residual cruda fue de 12%, 16% y 18% para la lámina aplicada, la lámina media y la lámina calculada, respectivamente. Con el empleo de agua residual parcialmente tratada, la tasa de mineralización se elevó a 20%, 21% y 27%, para las mismas láminas de riego. Lo anterior, es atribuible a lo descrito por Chater y Mattingly (1980), mencionado en Addiscott (1995), quienes señalaron que la mineralización liberaba grandes cantidades de fosfato (entre 0.5 y 8.5 kg/Ha/año) al suelo y que éstas representaban cerca de la mitad de fosfato anual consumido por las plantas. Además, la tasa de mineralización del fósforo estuvo relacionada con la mineralización de la materia orgánica del suelo, la cual, para el agua residual cruda osciló de 3%, 3.1% y 4.5% para la lámina aplicada, la lámina media y la lámina calculada, respectivamente. Por su parte, dicha mineralización se observó ligeramente mayor con el empleo de agua residual parcialmente tratada con la cual se obtuvieron tasas de 3.5%, 4.35 y 4.7% para las mismas láminas de riego. Los valores obtenidos en este experimento, fueron mayores a los encontrados por Herre and Siebe (2003), quienes señalaron una tasa de mineralización para leptosoles irrigados a lo largo de muchos años con agua residual cruda de 0.9 a 1.6 %. Las diferencias encontradas pueden atribuirse primeramente, a que el tipo de suelo empleado en el presente experimento tiene una mayor cantidad de materia orgánica, además de que las condiciones del experimento son más favorables respecto a las ocurridas en campo para estimular la actividad microbiana y en consecuencia aumentar el consumo de materia orgánica.

Por otro lado, Herre y Siebe (2003), señalaron que el riego con agua residual tratada disminuye la entrada de materia orgánica y particulada al suelo, causando un incremento importante en la mineralización de la materia orgánica como energía fácilmente disponible. Por lo anterior, la tasa de mineralización de la materia orgánica empleando agua residual parcialmente tratada fue ligeramente mayor que la obtenida con agua residual cruda.

Con respecto a las sales, la conductividad eléctrica del suelo registró un incremento importante del 40 y 20% para agua residual cruda y agua residual parcialmente tratada, respectivamente.

En conclusión, existieron diferencias entre la calidad inicial y final del suelo, con excepción del nitrógeno, para el cual no se observó variación a lo largo del experimento ni entre los tipos de agua residual, ni entre las láminas de riego. De manera general, se observó una disminución en el contenido de P disponible y materia orgánica, en ambos tipos de agua residual, aunque esta variación fue más notable cuando se empleó agua residual parcialmente tratada. Respecto a la conductividad eléctrica de la solución del suelo, aunque ambos tipos de agua residual mostraron un incremento de la misma, el valor obtenido usando agua residual fue mayor.

Tabla 4.5 Caracterización fisicoquímica del suelo al final del experimento para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.

Parámetro	Suelo al inicio	ARC			ARP		
		LA	LM	LC	LA	LM	LC
Carbono (%)	3,35	3.2±0,02	3.2±0,08	3.15±0,09	3.18±0,07	3.18±0,05	3.14±0,15
Materia orgánica (%)	5,7	5.52±0,02	5.51±0,07	5.43±0,08	5.49±0,07	5.44±0,05	5.42±0,14
Nitrógeno (%)	0,33	0.33±0	0.33±0	0.32±0	0.33±0	0.32±0	0.33±0
Relación C/N	10	9.7	9.7	9.8	9.6	9.9	9.5
P Olsen (mg/kg)	77	64.4±2,68	61,4±2,95	59.5±5,74	58.5±6,75	57.5±3,69	53.5±5,31
CE (dS/m)	1,04	1.61±0,02	1.6±0,07	1.5±0,06	1.4±0,08	1.3±0,03	1,3±0,01

ARC: Agua Residual Cruda ARP: Agua Residual Parcialmente tratada
 LA: Lámina Aplicada LM: Lámina Media LC: Lámina Calculada

4.13 Caracterización fisicoquímica del suelo al final del experimento

4.13.1 Nitrógeno total

Para el contenido de nitrógeno total en el suelo, estadísticamente no se observaron diferencias significativas al comparar entre los dos tipos de agua residual y entre las láminas de riego ($F= 0.65$, $g.l= 5$, 23). Incluso, los valores obtenidos para los dos tipos de agua de riego y las tres láminas de riego fueron prácticamente los mismos.

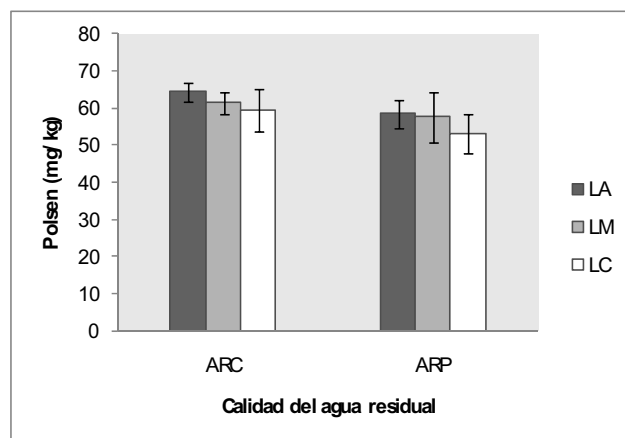
Lo anterior demostró que una disminución en el aporte de nitrógeno al suelo, con respecto al que se aplica actualmente, no tiene efectos sobre la cantidad del nitrógeno que el suelo puede almacenar. No obstante, cantidades excesivas de nitrógeno que no se alcanzan a absorber en el suelo se pierden vía lixiviación o desnitrificación contaminando las aguas subterráneas por nitratos (Jiménez *et al.*, 2004) o la atmósfera por gases como el N₂O (Ramírez-Fuentes *et al.*, 2002), respectivamente.

A pesar de que el tiempo del experimento podría considerarse un factor debido al cual dichas variaciones no se observaron, de acuerdo con Siebe y Cifuentes (1995), el incremento en el contenido de nitrógeno en los suelos del Valle del Tula, incluso después de 80 años bajo riego con aguas residuales, es demasiado bajo con respecto al nitrógeno total incorporado sobre todo si existe fijación microbiana, lo cual indica que en efecto este elemento se pierde por alguna de las dos vías antes mencionadas.

4.13.2 Fósforo disponible

La Figura 4.15 muestra el contenido de fósforo disponible en el suelo para los dos tipos de agua y las tres láminas de riego.

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis de varianza, no se encontraron diferencias significativas en el contenido de fósforo disponible ($F= 0.07$, $g.l= 5, 23$) al comparar entre los dos tipos de agua empleada y entre las láminas de riego.



ARC: Agua Residual Cruda ARP: Agua Residual Parcialmente tratada
 LA: Lámina Aplicada LM: Lámina Media LC: Lámina Calculada

Figura 4.15 Contenido de fósforo disponible en mg/kg en el suelo para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.

No obstante, los valores obtenidos para las tres láminas de riego con agua residual cruda fueron mayores a los valores obtenidos empleando agua residual parcialmente tratada.

Al comparar entre las láminas de riego con agua residual cruda, se observó un contenido mayor de fósforo disponible en el suelo cuando se empleó la lámina aplicada cuyo valor fue de 64.4 ± 2.7 mg/kg. El contenido de fósforo disponible en el suelo disminuyó en un 4.5% (61.4 ± 5.7 mg/kg) cuando se usó la lámina media y en un 7.5% (59.5 ± 2.9 mg/kg) con la lámina calculada. Respecto al uso del agua residual parcialmente tratada, la lámina de riego más eficiente nuevamente fue la lámina aplicada, para la cual el contenido de fósforo disponible en el suelo fue de 58.5 ± 6.7 mg/kg. Dicho valor disminuyó en un 2% (57.5 ± 5.3 mg/kg) cuando se empleó la lámina media y en un 7% (53.2 ± 3.6 mg/kg) con el uso de la lámina calculada.

A pesar de que se observaron reducciones en el contenido de fósforo disponible en el suelo, estas no fueron significativamente diferentes dada la variación en los datos obtenidos. Por lo tanto, es posible decir que una disminución en la aplicación de fósforo al suelo a través de las aguas residuales mantiene el contenido de éste en los mismos niveles, con respecto a las cantidades aplicadas actualmente. Esto además, permite reducir los contenidos de fósforo en los lixiviados que se generan cuando se sobrepasa la capacidad de absorción del suelo por aplicaciones repetidas de fósforo en cantidades que exceden la requerida por los cultivos (Stevenson y Cole, 2002).

4.13.3 Materia orgánica

Estadísticamente, no se observaron diferencias significativas en el contenido de materia orgánica en el suelo, al comparar entre los dos tipos de agua residual empleada y entre las láminas de riego ($F= 0.87$, $g.l= 5, 23$).

Al comparar entre las láminas de riego para el agua residual cruda, el mayor contenido de materia orgánica del suelo se obtuvo con el empleo de la lámina aplicada cuyo valor fue de $5.52 \pm 0.02\%$. Dicho contenido disminuyó en un 0.2% ($5.51 \pm 0.07\%$) cuando se usó la lámina media y en un 2% ($5.43 \pm 0.08\%$) con la lámina calculada. Respecto al uso del agua residual parcialmente tratada, nuevamente el contenido más alto de materia orgánica en el suelo se observó con la lámina aplicada, cuyo valor fue de $5.49 \pm 0.07\%$.

Este valor disminuyó en un 1% ($5.44 \pm 0.05\%$) con la lámina media y en un 1.5% ($5.42 \pm 0.14\%$) con la lámina calculada.

La existencia de diferencias mínimas encontradas tanto al variar el tipo de agua residual como al disminuir las láminas de riego puede atribuirse, por un lado, a que los procesos de descomposición para la síntesis de materia orgánica estable del suelo ocurren muy lentamente (Stevenson y Cole, 1999). Por lo anterior y dado que la duración del experimento fue de sólo 6 meses, no se pudieron observar dichas diferencias.

Por otro lado, a pesar de que numerosas investigaciones (Siebe y Cifuentes, 1995, Siebe, 1998, Ramírez-Fuentes *et al.*, 2002) han señalado un importante incremento en el contenido de materia orgánica a través del tiempo en los suelos irrigados con agua residual, pocos estudios se han realizado sobre la calidad de dicha materia orgánica en el suelo. Jueschke *et al.* (2007), investigaron el efecto de la irrigación con agua residual tratada y agua de primer uso sobre el contenido de carbono orgánico del suelo, la cantidad de la materia orgánica disuelta y la calidad de la misma, concluyendo que, no se observaron diferencias en los contenidos de materia orgánica en los primeros 20 cm del suelo para ambas calidades de agua residual. No obstante, los efectos pronunciados parecen ser relevantes en los horizontes profundos del suelo que reciben excedentes de materia orgánica que no alcanza a ser removida en su paso por el suelo, a través de los percolados estimulando la actividad microbiana. De acuerdo con Friedel *et al.* (2002), este problema se acentúa más con el empleo de aguas residuales crudas debido a que, los contenidos de materia orgánica fácilmente degradable en los lixiviados son mayores y en consecuencia, la actividad microbiana aumenta.

En conclusión, para las condiciones de este experimento la disminución de la lámina de riego con respecto a la actualmente empleada, así como el uso de agua residual parcialmente tratada permitió mantener el contenido de materia orgánica en el suelo. Un menor aporte de materia orgánica al suelo reduce los contenidos de materia orgánica en los lixiviados que percolan a estratos más profundos, frenando la estimulación microbiana y con ello la mineralización de la materia orgánica. Además se reduce la producción de dióxido de carbono (gas invernadero) que se eleva exponencialmente en respuesta a la actividad microbiana cuando existen abundantes recursos alimenticios (Brady, 2002) y que contribuye al cambio climático.

4.13.4 Importancia de la relación C/N en el suelo.

De acuerdo con Brady (2002), una relación C/N adecuada en la materia orgánica de la superficie arable de los suelos comúnmente se encuentra en el intervalo de 8:1 a 15:1. En este caso dicha relación se encontró de 10:1. Esto implica que para todos los tratamientos existió una relación adecuada de ambos nutrientes. Además, este valor coincide con lo reportado por Siebe (1994), quien encontró valores entre 9:1 y 10:1 para suelos feozem en el Valle del mezquital bajo riego con aguas residuales durante 16 y 80 años, respectivamente.

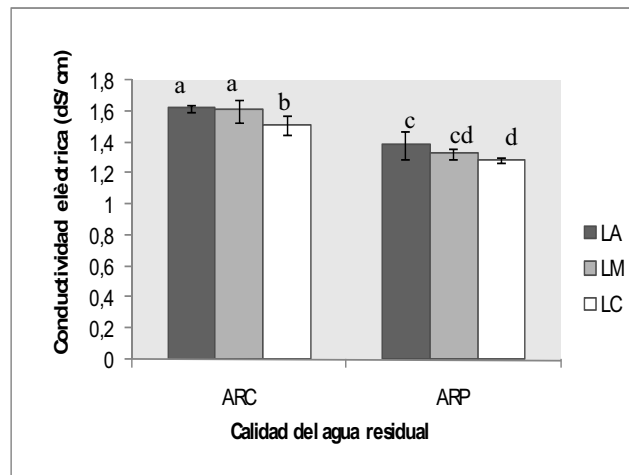
4.13.5 Conductividad eléctrica

El análisis estadístico reveló que, de manera general, existieron diferencias significativas al comparar entre los dos tipos de agua residual y entre las láminas de riego ($F < 0.0001$, $g.l = 5, 23$).

Al comparar entre los dos tipos de agua residual, se observó que con el empleo de agua residual cruda la conductividad eléctrica obtenida con las tres láminas de riego fue significativamente mayor a la obtenida empleando agua residual parcialmente tratada.

Por su parte, al contrastar entre las láminas de riego para el agua residual cruda, el valor más alto de conductividad eléctrica lo obtuvo la lámina aplicada que fue de 1.61 ± 0.02 mS/cm, disminuyendo en apenas 1% con el empleo de la lámina media. No se observaron diferencias significativas entre estas dos láminas. Sin embargo, sí se observaron diferencias estadísticas entre estas dos láminas y la lámina calculada que tuvo el valor más bajo de conductividad y fue de 1.51 ± 0.06 (Duncan, $g.l = 5, 23$ $P = 0.05$). Respecto al uso del agua residual parcialmente tratada, de igual manera el valor más elevado de conductividad eléctrica se observó con la lámina aplicada, cuyo valor fue de 1.38 ± 0.08 mS/cm. Dicho valor disminuyó en un 4% (1.33 ± 0.03) cuando se empleó la lámina media. No se observaron diferencias significativas entre estas dos láminas de riego, pero sí al comparar la lámina aplicada con respecto a la lámina calculada, para la

cual el valor de la conductividad eléctrica disminuyó en un 7% ($1.28 \pm 0.01\%$) (Duncan, $gl=5, 23 P=0.05$).



ARC: Agua Residual Cruda ARP: Agua Residual Parcialmente tratada
 LA: Lámina Aplicada LM: Lámina Media LC: Lámina Calculada

Figura 4.16 Variación en la conductividad eléctrica en la solución del suelo, al final del experimento para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.

El empleo del agua residual parcialmente tratada mantuvo la conductividad eléctrica en la solución del suelo a niveles más bajos que cuando se usó agua residual cruda. Entre las láminas de riego, los valores más bajos de conductividad eléctrica se obtuvieron empleando la lámina de riego calculada para los dos tipos de agua residual. Por lo tanto, el empleo de una lámina de riego menor permite el lavado de sales al mismo nivel que la lámina actualmente empleada, además de que una menor cantidad de sales se concentra en la solución del suelo cuando el agua es absorbida por las plantas y en consecuencia la conductividad eléctrica disminuye.

4.14 Concentración de los principales iones en suelo

La Tabla 4.6 muestra la concentración en meq/kg de cationes y aniones de importancia para la formación de sales en el suelo al final del experimento, para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.

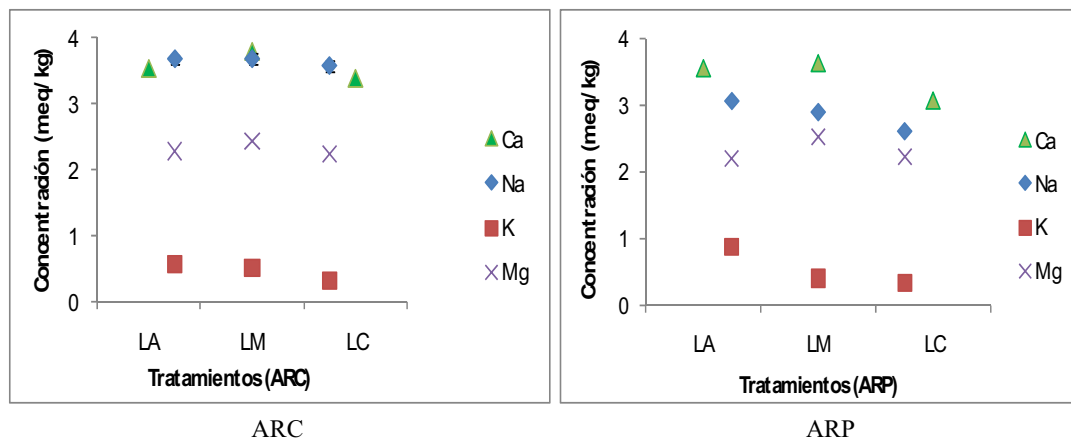
Tabla 4.6 Concentración (meq/kg) de los principales iones en suelo, al final del experimento para cada tratamiento y calidad del agua residual

Parámetro	ARC			ARP		
	LA	LM	LC	LA	LM	LC
<i>Na</i>	3,68±0,07	3,68±0,08	3,58±0,08	3,08±0,33	2,91±0,15	2,62±0,04
<i>K</i>	0,58±0,07	0,52±0,05	0,32±0,04	0,87±0,06	0,4±0,09	0,34±0,03
<i>Ca</i>	3,53±0,03	3,79±0,35	3,38±0,63	3,57±0,11	3,64±0,25	3,08±0,06
<i>Mg</i>	2,28±0,05	2,43±0,015	2,25±0,21	2,21±0,25	2,53±0,12	2,24±0,09
<i>Cl</i>	3,97±0,38	3,85±0,014	3,21±0,13	2,68±0,40	2,75±0,23	3,21±0,28
<i>NO₃</i>	0,18±0,01	0,21±0,02	0,2±0,03	0,17±0,03	0,25±0,09	0,2±0,02
<i>SO₄</i>	3,52±1,32	3,92±2,11	4,08±0,04	4,19±0	4,57±0,05	2,22±0,12

ARC: Agua Residual Cruda ARP: Agua Residual Parcialmente tratada
 LA: Lámina Aplicada LM: Lámina Media LC: Lámina Calculada

4.14.1 Cationes

De los cationes intercambiables analizados, el sodio mostró los mayores contenidos en la solución del suelo, cuando se usó agua residual cruda seguido por el calcio. Mientras que, para el agua residual parcialmente tratada el catión predominante fue el calcio seguido por el sodio. En tercer lugar, para los dos tipos de agua residual se absorbió magnesio y finalmente potasio (Figura 4.17).



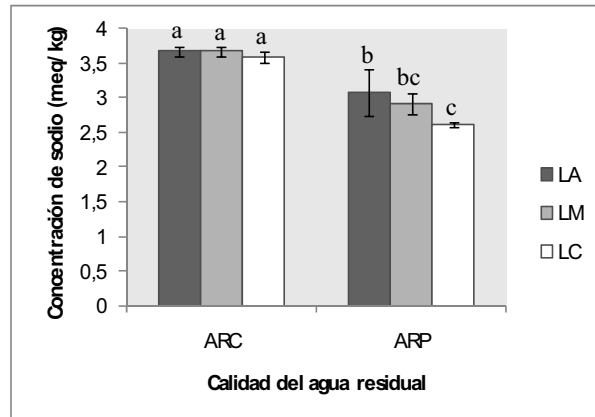
ARC: Agua Residual Cruda ARP: Agua Residual Parcialmente tratada
 LA: Lámina Aplicada LM: Lámina Media LC: Lámina Calculada

Figura 4.17 Concentración en meq/kg de los cationes analizados para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.

De los cationes analizados, los que mostraron diferencias significativas al comparar entre los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego fueron el sodio y el potasio, no así el calcio y el magnesio.

4.14.1.1 Sodio

La Figura 4.18 muestra el contenido de sodio en meq/kg en el suelo para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.



ARC: Agua Residual Cruda ARP: Agua Residual Parcialmente tratada
LA: Lámina Aplicada LM: Lámina Media LC: Lámina Calculada

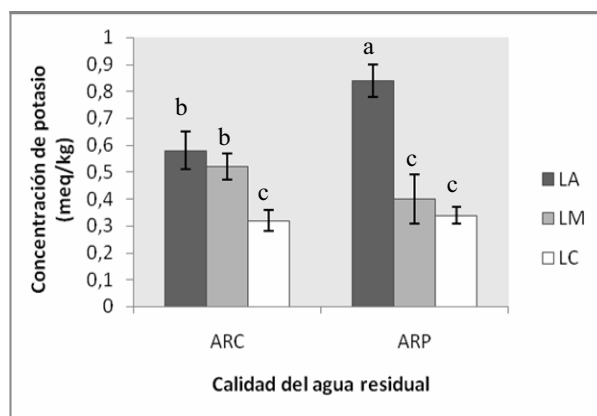
Figura 4.18 Concentración de sodio en meq/kg para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego

Estadísticamente, se encontró que el contenido de sodio en la solución del suelo fue significativamente mayor en las tres láminas de riego cuando se usó agua residual cruda con respecto a cuando se usó agua residual parcialmente tratada ($F < 0.0001$, $g.l = 5, 23$). Al comparar entre las láminas de riego con agua residual cruda, se observó que el contenido de sodio en la solución del suelo disminuyó ligeramente conforme se redujo la lámina de riego. Sin embargo, esta reducción no fue significativamente diferente. El empleo de agua residual parcialmente tratada mostró un comportamiento similar, sólo que al comparar entre las láminas de riego se encontraron diferencias significativas entre la lámina aplicada que mostró el valor más elevado el cual fue de 70.7 meq/kg y la lámina calculada cuyo valor fue de 60.33 meq/kg.

La importancia del contenido de sodio en la solución del suelo, está relacionada con el peligro de producir sodicidad debido a la acumulación de sodio intercambiable en el suelo, el cual causa la dispersión de la arcilla e induce a la formación de incrustaciones sobre la superficie del suelo, trayendo como consecuencia efectos detrimentales sobre la estructura del suelo y el intercambio de gases (Siebe, 1998).

4.14.1.2 Potasio

La Figura 4.19 muestra el contenido de potasio en meq/kg en el suelo para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.



ARC: Agua Residual Cruda ARP: Agua Residual Parcialmente tratada
LA: Lámina Aplicada LM: Lámina Media LC: Lámina Calculada

Figura 4.19 Concentración de potasio en meq/kg para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego

Estadísticamente existieron diferencias al comparar entre los dos tipos de agua residual y las láminas de riego ($F < 0.0001$, $g.l = 5, 23$).

Al comparar entre los dos tipos de agua residual, se observó que el tratamiento lámina aplicada con agua residual parcialmente tratada fue mayor y significativamente diferente que todas las láminas de riego con agua residual cruda. Lo anterior, puede atribuirse a un efecto antagonista con el calcio y el magnesio, los cuales no permitieron que el potasio fuera absorbido por la alfalfa y en consecuencia se acumulara en la solución del suelo.

Al comparar entre las láminas de riego para el agua residual cruda, se observó que el contenido de potasio disminuyó conforme la lámina de riego se redujo. Sin embargo, no existieron diferencias significativas entre los tratamientos lámina aplicada y lámina media, pero sí de estas dos con respecto a la lámina calculada (Duncan, $g.l = 5, 23$ $P = 0.05$) que registró el valor más bajo. Para el agua residual parcialmente tratada se observó, de igual manera, una disminución en el contenido de potasio al reducir la

lámina de riego. Además, para este tipo de agua se observaron diferencias significativas entre el tratamiento lámina aplicada con respecto a la lámina media y la lámina calculada, no así entre ellas dos.

4.14.1.3 Calcio y magnesio

No se observaron diferencias significativas en la concentración de calcio y magnesio en los extractos acuosos del suelo al comparar entre los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego ($F= 0.1535$, $g.l= 5, 23$) y ($F= 0.0747$, $g.l= 5, 23$), respectivamente. La inexistencia de variaciones en la solución del suelo al disminuir la lámina de riego, puede deberse a que estos elementos no se consideran limitantes y se encuentran en cantidades considerables en el suelo, dada la naturaleza del mismo. Por esto, una disminución en la entrada de calcio y magnesio a través del agua residual no tiene efecto sobre ellos.

4.14.1.4 Relación de absorción de sodio (RAS)

De acuerdo con Brady, (1998) un RAS por debajo de 10 se considera en los rangos normales para el suelo, en los cuales no existen problemas de sodicidad. En el presente experimento el RAS para las tres láminas de riego con agua residual cruda fue de 2.1. Mientras que con el empleo de agua residual parcialmente tratada este se encontró en 1.8, 1.7 y 1.6 para la lámina aplicada, la lámina media y la lámina calculada, respectivamente. Con lo anterior, es posible decir que para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego los niveles de RAS en el suelo se encontraron dentro de los límites adecuados.

4.14.2 Aniones

De los aniones intercambiables analizados para los dos tipos de agua residual, los cloruros mostraron los mayores contenidos en la solución del suelo, seguido por los sulfatos y finalmente los nitratos. Estadísticamente, solo se encontraron diferencias significativas para los cloruros, no así para sulfatos ($F= 0.2785$, $g.l= 5, 23$) y nitratos ($F= 0.8270$, $g.l= 5, 23$).

4.14.2.1 Cloruros

La Figura 4.20 muestra el contenido de cloruros en meq/kg en el suelo para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.

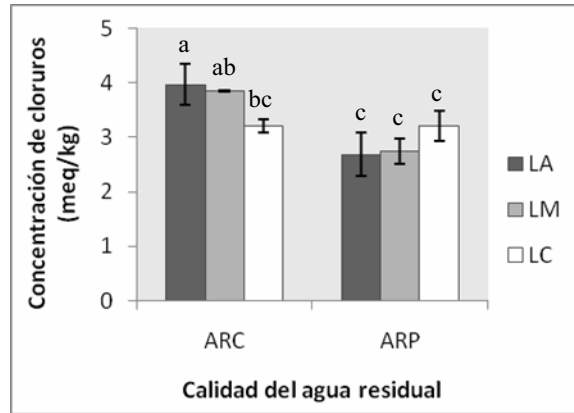


Figura 4.20 Contenido de cloruros en meq/kg en el suelo para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.

Estadísticamente, se encontró que el contenido de cloruro en la solución del suelo cuando se usó agua residual cruda fue significativamente diferente en las tres láminas de riego con respecto a cuando se empleó agua residual parcialmente tratada ($F=0.0011$, $g.l= 5, 23$). Al comparar entre las láminas de riego con agua residual cruda, se observó que el contenido de cloruro en la solución del suelo disminuyó conforme se redujo la lámina de riego, sin embargo esta reducción solo fue significativa al comparar entre la lámina media y la lámina calculada. Para el agua residual parcialmente tratada, se observó que el contenido de cloruro en la solución del suelo aumentó conforme se redujo la lámina de riego. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre las láminas de riego.

El contenido de cloruro en la solución del suelo es importante dado que si bien el cultivo de alfalfa precisa de este elemento como un micronutriente, cantidades excesivas pueden tener consecuencias tóxicas sobre el cultivo.

4.15 Aporte de nutrientes

4.15.1 Balance de nitrógeno en el sistema

Para realizar el balance de nitrógeno se consideraron tanto las entradas como las salidas de este elemento en el sistema, bajo la siguiente ecuación:

$$\begin{array}{ccc} \text{Entrada} & & \text{Salida} \\ N_{\text{agua residual}} & = & N_{\text{absorbe alfalfa}} + N_{\text{lixiviado}} \end{array}$$

4.15.1.1 Entradas

El cálculo de las entradas de nitrógeno al sistema se realizó para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego de la siguiente manera:

Agua residual: La concentración de nitrógeno total en el agua residual cruda que ingreso al sistema fue de 50 ± 5 mg/L, mientras que para las aguas residuales parcialmente tratadas fue de 27 ± 3 mg/L de N total. Por otro lado, las láminas de riego fueron de 23cm (lámina aplicada), 20cm (lámina media) y 13cm (lámina calculada) por cada riego en un área de 0.0172 m^2 correspondiente a una columna.

4.15.1.2 Salidas

Absorción de Nitrógeno por la alfalfa: la absorción de nitrógeno por la alfalfa de acuerdo con González, (2007) se calculó multiplicando el contenido de nitrógeno en los tejidos vegetales por la biomasa cosechada en peso seco. Los resultados de la absorción de nitrógeno y el peso seco de la alfalfa para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego se muestran en las Tablas 4.7 y 4.8, respectivamente.

Tabla 4.7 Contenido de nitrógeno en el tejido de alfalfa para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.

	ARC			ARP		
	LA	LM	LC	LA	LM	LC
<i>N(%)</i>	3.75±0.17	3.66±0.23	3.48±0.18	3.45±0.22	3.36±0.22	3.3±0.04

Tabla 4.8 Peso seco en gramos del tejido de alfalfa para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.

	ARC			ARP		
	LA	LM	LC	LA	LM	LC
<i>Peso seco (gr)</i>	16,7	15,4	14,8	14,4	14,1	14,5

Lixiviación: la cantidad de N-NO₂, N-NO₃, N-NH₄ y N orgánico lixiviada se obtuvo con el promedio de la concentración de los mismos en el lixiviado y multiplicado por los centímetros de agua que salieron del sistema para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.

Los balances de masa para el Nitrógeno, se muestran en las Tablas 4.9 y 4.10

Tabla 4.9 Balance de nitrógeno en el sistema de estudio, para el agua residual cruda (ARC) y las tres láminas de riego Lámina Aplicada (LA), Lámina Media (LM) y Lámina Calculada (LC).

Entradas	LA-ARC g N / columna/ riego	LM-ARC (g N/ columna/ riego)	LC-ARC (g N/ columna/ riego)
láminas de riego (26cm)	2,3	1,87	1,28
Salidas			
Absorción por la alfalfa	0,62	0,56	0,52
Lixiviación			
N-NO ₃	0,4	0,22	0,14
N-NO ₂	0,07	0,055	0,03
N-NH ₄	0,03	0,016	0,003
N org	0,27	0,21	0,09
Entradas-salidas	0,91	0,81	0,5

Tabla 4.10 Balance de nitrógeno en el sistema de estudio, para el Agua Residual Parcialmente tratada (ARP) y las tres láminas de riego Lámina Aplicada (LA), Lámina Media (LM) y Lámina Calculada (LC).

Entradas	LA-ARP	LM-ARP	LC-ARP
	g N/ columna/ riego	(g N/ columna/ riego)	(g N/ columna/ riego)
láminas de riego (26cm)	1,29	1,07	0,73
Salidas			
Absorción por la alfalfa	0,5	0,47	0,46
Lixiviación			
N-NO₃	0,43	0,29	0,17
N-NO₂	0	0	0
N-NH₄	0,03	0,02	0,01
N org	0,19	0,14	0,09
Entradas-salidas	0,14	0,15	0

De acuerdo a los resultados obtenidos, al comparar entre los dos tipos de agua se observó que de manera general la lixiviación de nitrógeno en forma de nitratos ocurre con los dos tipos de agua residual. Sin embargo, el uso de agua residual parcialmente tratada favoreció la lixiviación de nitratos y redujo la pérdida de nitrógeno por otras vías como podría ser la desnitrificación. Esto puede atribuirse a un menor contenido de materia orgánica y un mayor contenido de oxígeno disuelto en el agua residual parcialmente tratada, lo cual favorece la conversión de nitrógeno a nitratos. Por su parte, el empleo de agua residual cruda favoreció la lixiviación de nitrógeno en forma orgánica, además de la pérdida de nitrógeno por otras vías como puede ser la desnitrificación, lo cual sería de esperarse dado los elevados contenidos de materia orgánica en el agua residual y las condiciones de inundación en el sistema. La lixiviación de nitritos solo se observó en los lixiviados obtenidos con agua residual cruda. Respecto de la lixiviación de nitrógeno como amonio, los dos tipos de agua residual tuvieron niveles muy parecidos.

El porcentaje de absorción de nitrógeno por la alfalfa aumento al disminuir la lámina de riego, con lo cual se observó un mejor aprovechamiento del nitrógeno por parte de la alfalfa.

Al comparar entre las láminas de riego para el agua residual cruda, el empleo de la lámina media redujo en un 50%, 29%, 50% y 22% el contenido de N-NO₃, N-NO₂, N-NH₄ y N en forma orgánica en los lixiviados, respectivamente con respecto a lo aportado por la lámina aplicada. Por su parte la lámina calculada redujo en un 65%, 57%, 90% y 63% el contenido de los mismos iones, respectivamente.

Para el agua residual parcialmente tratada, al comparar entre las láminas de riego se observó que el empleo de la lámina media redujo en un 33%, 50% y 26% el contenido de $N-NO_3$, $N-NH_4$ Y N orgánico, respectivamente con respecto a lo aportado por la lámina aplicada. Por su parte, la lámina calculada redujo en un 60, 65 y 50% el contenido de los mismos iones, respectivamente.

Para los dos tipos de agua residual, la lámina de riego más eficiente en términos de reducción de la lixiviación de nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal y nitrógeno en forma orgánica resultó ser la lámina calculada.

Para este balance de masas no se contó con datos de la fijación de nitrógeno por parte de las bacterias asociadas a las raíces de alfalfa, lo cual podría traer como consecuencia una posible subestimación de los valores reales. Por otro lado, los lixiviados obtenidos tuvieron una trayectoria de 30 cm en el suelo, con lo cual se podría sobreestimar los valores de nitrógeno que lixiviarían al acuífero. No obstante, este balance nos ofrece información acerca de que la lixiviación de nitrógeno como nitratos es una pérdida importante de nitrógeno del sistema, sobre todo cuando se riega con agua residual parcialmente tratada. Al igual que, existe pérdida de nitrógeno por otras vías como puede ser la desnitrificación cuando se riega con agua residual cruda.

En el Valle de Tula, una reducción en la lixiviación de nitratos es importante dado que, de acuerdo con el BGS, (1995) tres cuartas partes de las fuentes de abastecimiento del Valle exceden el límite de la normatividad mexicana (NOM-127-SSA1-1994) de nitratos en agua para consumo humano el cual es de 10 mg $N-NO_3/L$. La importancia de los nitratos es en términos de salud pública, debido a que se le ha relacionado con el padecimiento de la metahemoglobinemia que afecta a los infantes (Pacheco et al., 2002). Sin embargo, hoy en día, se cuestiona la participación de los nitratos como un cofactor de dicho padecimiento (Fewtrell, 2004).

4.15.2 Balance de masas del fósforo.

Para realizar el balance de fósforo, al igual que el nitrógeno se consideraron tanto las entradas como las salidas de este elemento en el sistema, bajo la siguiente ecuación:

$$P_{(P-PO_4) \text{ agua residual}} = P_{\text{absorbe alfalfa}} + P_{(P-PO_4) \text{ lixiviado}}$$

4.15.2.1 Entradas

El cálculo aproximado de las entradas de fósforo al sistema se realizó para las dos calidades de agua residual y las tres láminas de riego de la misma manera que para el N, considerando lo siguiente:

Agua Residual: Las concentraciones de P-PO₄ en el agua residual cruda que ingreso al sistema fue de 12±5 mg/L, mientras que en las aguas residuales parcialmente tratadas fue de 8.5±3 mg/L. Por otro lado, las láminas de riego fueron de 23cm (lámina aplicada), 20cm (lámina media) y 13cm (lámina calculada) en un área de 0.0172 m² correspondiente a una columna. Los valores obtenidos se expresan en las tablas 4.17 a la 4.22.

4.15.2.2 Salidas

Absorción de P por la alfalfa: la absorción de P por la alfalfa se estimó multiplicando el contenido de P en los tejidos vegetales por la biomasa cosechada en peso seco. Los contenidos de P y el peso seco se muestran en las Tablas 4.11 y 4.12, respectivamente para cada tratamiento y calidad del agua residual.

Tabla 4.11 Contenidos de fósforo en los tejidos de alfalfa para las tres láminas de riego y las dos calidades de agua residual.

		ARC			ARP		
	LA	LM	LC	LA	LM	LC	
P (%)	0,3±0,012	0,3±0,018	0,29±0,011	0,28±0,013	0,28±0,009	0,27±0,009	

Tabla 4.12 Peso seco (g) obtenido al final del experimento para las tres láminas de riego y las dos calidades de agua residual.

	ARC			ARP		
	LA	LM	LC	LA	LM	LC
<i>Peso seco (gr)</i>	16,7	15,4	14,8	14,4	14,1	14,5

Lixiviación: la cantidad de P-PO₄ lixiviados se obtuvo con el promedio de la concentración de P-PO₄ en el lixiviado a lo largo del riego multiplicado por los centímetros de agua que salieron del sistema para cada lámina de riego y calidad del agua residual.

Los balances de masa para el P, se muestran en las Tablas 4.13 y 4.14.

Tabla 4.13 Balance de fósforo en el sistema de estudio, para el agua residual cruda (ARC) y las tres láminas de riego Lámina Aplicada (LA), Lámina Media (LM) y Lámina Calculada (LC).

Entradas	LA-ARC	LM-ARC	LC-ARC
	g P/ columna/ riego	(g P/ columna/ riego)	(g P/ columna/ riego)
láminas de riego (26cm)	0,48	0,42	0,27
Salidas			
Absorción por la alfalfa	0,05	0,046	0,042
Lixiviación			
P-PO ₄	0,66	0,53	0,35
Entradas-salidas	-0,23	-0,15	-0,12

Tabla 4.14 Balance de fósforo en el sistema de estudio, para el Agua Residual Parcialmente tratada (ARP) y las tres láminas de riego Lámina Aplicada (LA), Lámina Media (LM) y Lámina Calculada (LC).

Entradas	LA-ARP	LM-ARP	LC-ARP
	g P/ columna/ riego	(g P/ columna/ riego)	(g P/ columna/ riego)
láminas de riego (26cm)	0,34	0,3	0,19
Salidas			
Absorción por la alfalfa	0,041	0,039	0,038
Lixiviación			
P-PO ₄	0,73	0,61	0,22
Entradas-salidas	-0,43	-0,35	-0,07

En este balance de masas se observó, para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego, que las salidas de fósforo del sistema superaron las entradas del mismo. Esto puede explicarse de varias maneras: la primera, es referente a la saturación

de los sitios de sorción de fósforo en el suelo, debido a que cuando se aplica este elemento en cantidades que exceden la requerida por los cultivos, se acumula en los perfiles del suelo hasta que la capacidad de sorción se rebasa y el transporte vertical provoca la contaminación de aguas subterráneas (Chardon, 2007). El problema de lixiviación de fósforo se agrava de acuerdo con Zvomuya (2006), sobre todo en suelos con drenaje deficiente y altos contenidos de materia orgánica, así como suelos con una larga historia de aplicación de aguas residuales. Respecto a esto, es importante señalar que los suelos del Valle de Tula cumplen expresamente con estas características.

Por otro lado, de acuerdo con Addiscott (1999), se han reconocido diversos factores que tienen influencia en la capacidad de sorción y desorción de fósforo en el suelo y que pueden relacionarse con las condiciones existentes en el presente experimento. La primera de ellas es: a) la proporción de suelo a través de la cual pasa el agua, dado que cuando el agua que percola a través del suelo tiene contacto solamente con una proporción limitada de los sitios de sorción del suelo y b) la formación de flujos preferenciales que afecta principalmente el tiempo de residencia del agua en el suelo y, en consecuencia, la absorción del fósforo dado que éste se absorbe lentamente en el suelo.

En este experimento, tanto la porción de suelo empleada, como los tiempos de residencia cortos del agua en las columnas, pudieron influenciar la capacidad del suelo sobre la sorción de fósforo y, en consecuencia, favorecer la lixiviación del mismo.

De acuerdo a los resultados obtenidos, al comparar entre los dos tipos de agua residual se observó que de manera general la pérdida de fósforo en forma de fosfatos ocurrió con los dos tipos de agua residual. Sin embargo, el uso de agua residual parcialmente tratada favoreció la lixiviación de fosfatos en cantidades considerables respecto de cuando se usó agua residual cruda. Esto puede atribuirse a que con el empleo de agua residual parcialmente tratada, existe un cambio en la concentración de fosfatos en la solución del suelo que provoca la desorción de los mismos. Además, la tasa de mineralización del fósforo fue mayor cuando se empleó agua residual parcialmente tratada.

Por su parte, el porcentaje de absorción de fósforo por la alfalfa aumento al disminuir la lámina de riego, con lo cual se observó un mejor aprovechamiento del fósforo por parte de la alfalfa.

Al comparar entre las láminas de riego para el agua residual cruda el empleo de la lámina media redujo en un 20% el contenido de P-PO₄ en los lixiviados con respecto a cuando se usó la lámina aplicada. Por su parte, con el empleo de la lámina calculada se

redujo en un 53%. Para el agua residual parcialmente tratada, al comparar entre las láminas de riego se observó que el empleo de la lámina media redujo en un 16% el contenido de P-PO₄ respecto a lo aportado por la lámina aplicada. Por su parte, la lámina calculada redujo en 70% el contenido de fosfatos en los lixiviados.

Para los dos tipos de agua residual, la lámina de riego más eficiente en términos de reducción de la lixiviación de fosfatos fue la lámina calculada.

Es importante considerar nuevamente que los lixiviados obtenidos tuvieron una trayectoria de 30 cm en el suelo, con lo cual se podría sobreestimar los valores de fosfatos que lixiviarían al acuífero. No obstante, este balance nos ofrece información acerca de que la lixiviación de fosfatos es una pérdida importante de fósforo del sistema y que esto podría deberse a la saturación de los suelos dado las prácticas de riego actuales.

En el Valle de Tula, una reducción en la lixiviación de fosfatos es importante para frenar la contaminación del agua en las fuentes de abastecimiento por el fenómeno de eutrofización que reduce la calidad del agua. Además, un problema de particular importancia es la producción de toxinas por ciertas especies de algas (cianobacterias) que son peligrosas cuando dichas aguas se emplean para consumo humano (Diederik *et al.*, 1998).

CAPÍTULO 5 Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en esta tesis se concluye que el empleo de una lámina de riego menor a la actualmente empleada en el Valle de Tula, es factible dado que permite disminuir, en promedio, un 45% el aporte de nutrientes, materia orgánica y sales en los lixiviados, al mismo tiempo que mantiene la productividad y calidad del cultivo de alfalfa, así como la reserva de nutrientes y materia orgánica del suelo y un buen nivel de lavado de sales en el mismo.

Lixiviados

Para los nutrientes, el empleo de agua residual parcialmente tratada favoreció en gran medida la lixiviación de nitratos y fosfatos. En el caso del nitrógeno, el agua residual cruda incrementó la pérdida de éste por otras vías (desnitrificación). Referente a la materia orgánica, al comparar entre las dos calidades de agua residual, el empleo de agua residual parcialmente tratada permitió disminuir en un 50% el aporte de materia orgánica medida como DQO total y soluble en los lixiviados. Por otra parte, la conductividad eléctrica de los lixiviados cuando se empleó agua residual parcialmente tratada fue menor que cuando se usó agua residual cruda. No obstante, en los dos tipos de agua residual, las tres láminas de riego tuvieron eficiencias similares en el lavado de sales. El contenido de sales en los dos tipos de agua residual fue muy parecido, por lo que no hubo diferencias importantes en términos de aportación de sales entre los dos tipos de agua residual. Lo anterior demuestra que el tratamiento de las aguas residuales no resuelve el problema de las cargas de sales aportadas al acuífero.

Para los dos tipos de agua residual, la lámina de riego más eficiente en términos de reducción de la lixiviación de nitrógeno en todas sus formas, fósforo, materia orgánica y sales fue la lámina calculada con base en la evapotranspiración y el lavado de sales la cual redujo, en promedio, un 45% la carga contaminante en comparación con la lámina que actualmente se aplica.

Productividad del cultivo de Alfalfa

La productividad de la alfalfa se encontró en niveles semejantes tanto con el empleo de agua residual parcialmente tratada como con el agua residual cruda. De igual manera, al emplear láminas de riego menores (lámina media y lámina calculada) la productividad se mantuvo a niveles similares a los obtenidos con la lámina aplicada en el Valle de Tula. La calidad del cultivo de alfalfa, en términos de los elementos mayores es adecuada para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego, con respecto a lo reportado por diversos autores en la literatura. Por su parte, los elementos traza se encontraron por encima de lo requerido por el cultivo de alfalfa en los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego. La capacidad para formar proteínas determinada por la relación nitrógeno: azufre obtenida en el tejido de alfalfa con los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego se encontró dentro de los rangos adecuados señalados por la literatura.

Suelo

El contenido de nitrógeno, fósforo disponible y materia orgánica en el suelo fue similar para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego. La conductividad eléctrica de la solución del suelo fue menor cuando se empleó agua residual parcialmente tratada en comparación con el agua residual cruda. Además, la conductividad eléctrica de la solución del suelo disminuyó conforme se redujeron las láminas de riego. La lámina de riego con la cual se obtuvo una menor conductividad en la solución del suelo fue la lámina calculada. El RAS en la solución del suelo, se encontró dentro de los niveles considerados como normales para los dos tipos de agua residual y las tres láminas de riego.

Recomendaciones

Se recomienda realizar de manera completa los balances de masa para el nitrógeno, para tener la certeza del destino final del nitrógeno aplicado en exceso.

Se recomienda que antes de aplicar una lámina menor de riego de manera generalizada en el Valle de Tula, se hagan estudios parecidos a éste a nivel de campo.

Se recomienda realizar un estudio como éste empleando otros tipos de suelo.

Anexos

Anexo A.1

Cálculo de la evapotranspiración por el método de Blanney y Criddle

La evapotranspiración se determinó por el método de Blanney y Criddle donde la evapotranspiración potencial se calcula en función de la temperatura media mensual y del porcentaje de horas luz del mes, con respecto al total anual.

La fórmula empleada es:

$$E_t = K F$$

donde

E_t : evapotranspiración real total del cultivo expresada como lámina

K : coeficiente total de ajuste que depende del cultivo y de la ubicación en la zona de estudio

F : coeficiente de ajuste, que es el producto de varios factores, uno para el ajuste dimensional de la fórmula, otro por el tipo de cultivo y finalmente otro en función de la localización de la zona estudiada: que puede ser: región costera o zona árida.

El procedimiento para el cálculo, se describe a continuación:

- a. con la temperatura media mensual expresada en grados centígrados se entra a la tabla A.1.
- b. el valor obtenido se multiplica por el porcentaje de horas luz, el cual se obtiene de la tabla A.2, entrando con el mes y la latitud del lugar. La latitud del sitio para este experimento fue de
- c. el producto obtenido de A.1 x A.2 corresponde a la evapotranspiración potencial para cada mes (EVT_m).
- d. finalmente, la evapotranspiración real total (EVT_t) se obtiene multiplicando la evapotranspiración potencial de todos los meses (EVT_p) que comprende el ciclo vegetativo, por los valores globales de los cultivos que se obtienen de la tabla A.3 y que para este caso por ser cultivo de alfalfa en una zona árida resultó de 0.80.

Los resultados obtenidos de la evapotranspiración para los meses que comprendió el experimento se muestran en la Tabla A.4

Tabla A.1 Valores de la expresión $T + 17.8/21.8$ en relación con temperaturas medias en °C para usarse en la fórmula de Blanney y Criddle.

T °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	0.954	0.959	0.963	0.968	0.972	0.977	0.982	0.986	0.991	0.995
4	1.000	1.005	1.009	1.014	1.018	1.023	1.028	1.032	1.037	1.041
5	1.046	1.050	1.055	1.060	1.064	1.069	1.074	1.078	1.083	1.087
6	1.092	1.096	1.101	1.106	1.110	1.115	1.119	1.124	1.128	1.133
7	1.138	1.142	1.147	1.151	1.156	1.161	1.165	1.170	1.174	1.179
8	1.183	1.188	1.193	1.197	1.202	1.206	1.211	1.216	1.220	1.225
9	1.229	1.234	1.239	1.243	1.248	1.252	1.257	1.261	1.266	1.271
10	1.275	1.279	1.284	1.289	1.294	1.298	1.304	1.307	1.312	1.317
11	1.321	1.326	1.330	1.335	1.339	1.344	1.349	1.354	1.358	1.362
12	1.367	1.372	1.376	1.381	1.385	1.390	1.394	1.400	1.404	1.408
13	1.413	1.417	1.422	1.427	1.431	1.436	1.440	1.445	1.450	1.454
14	1.459	1.463	1.468	1.472	1.477	1.482	1.486	1.491	1.495	1.500
15	1.505	1.509	1.514	1.518	1.523	1.528	1.532	1.537	1.541	1.546
16	1.550	1.555	1.560	1.564	1.569	1.573	1.578	1.583	1.587	1.592
17	1.596	1.601	1.606	1.610	1.615	1.619	1.624	1.628	1.633	1.638
18	1.642	1.647	1.651	1.656	1.661	1.665	1.670	1.674	1.679	1.683
19	1.688	1.693	1.697	1.702	1.706	1.711	1.716	1.720	1.725	1.729
20	1.734	1.739	1.743	1.748	1.752	1.757	1.761	1.766	1.771	1.775
21	1.780	1.784	1.789	1.794	1.798	1.803	1.807	1.812	1.817	1.821
22	1.826	1.830	1.835	1.839	1.844	1.849	1.853	1.858	1.862	1.867
23	1.872	1.876	1.881	1.885	1.890	1.894	1.899	1.904	1.908	1.913
24	1.917	1.922	1.927	1.931	1.936	1.940	1.945	1.950	1.954	1.959
25	1.963	1.968	1.972	1.977	1.982	1.986	1.991	1.995	2.000	2.004
26	2.009	2.014	2.018	2.023	2.028	2.032	2.037	2.041	2.046	2.050
27	2.055	2.060	2.064	2.069	2.073	2.078	2.083	2.087	2.092	2.096
28	2.101	2.106	2.110	2.115	2.119	2.124	2.128	2.133	2.138	2.142
29	2.147	2.151	2.156	2.161	2.165	2.170	2.174	2.179	2.183	2.188
30	2.193	2.197	2.202	2.206	2.211	2.216	2.220	2.225	2.229	2.234
31	2.239	2.243	2.248	2.252	2.257	2.261	2.266	2.271	2.275	2.280
32	2.284	2.289	2.294	2.298	2.303	2.307	2.312	2.317	2.321	2.326
33	2.330	2.335	2.339	2.344	2.249	2.353	2.358	2.362	2.367	2.372
34	2.376	2.381	2.385	2.390	2.394	2.399	2.404	2.408	2.413	2.417
35	2.422	2.427	2.431	2.436	2.440	2.445	2.450	2.454	2.459	2.463

Tabla A.2. Tabla de porcentajes de horas luz o insolación en el día para cada mes del año en relación al número total en un año

LATITUD NORTE	MESES											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
15	7.94	7.37	8.44	8.45	8.98	8.80	9.03	8.83	8.27	8.26	7.75	7.88
16	7.93	7.35	8.44	8.46	9.01	8.83	9.07	8.85	8.27	8.24	7.72	7.83
17	7.86	7.32	8.43	8.48	9.04	8.87	9.11	8.87	8.27	8.22	7.69	7.80
18	7.83	7.30	8.42	8.50	9.09	8.92	8.16	8.90	8.27	8.21	7.66	7.74
19	7.79	7.28	8.41	8.51	9.11	8.97	9.20	8.92	8.28	8.19	7.63	7.71
20	7.74	7.26	8.41	8.53	9.14	9.00	9.23	8.95	8.29	8.17	7.59	7.66
21	7.71	7.24	8.40	8.54	9.18	9.05	9.29	8.98	8.29	8.15	7.54	7.62
22	7.66	7.21	8.40	8.56	9.22	9.09	9.33	9.00	8.30	8.13	7.50	7.55
23	7.62	7.19	8.40	8.57	9.24	9.12	9.35	9.02	8.30	8.11	7.47	7.50
24	7.58	7.17	8.40	8.60	9.30	9.20	9.41	9.05	8.31	8.09	7.43	7.46
25	7.53	7.13	8.39	8.61	9.32	9.22	9.43	9.08	8.30	8.08	7.40	7.41
26	7.49	7.12	8.40	8.64	9.38	9.30	9.49	9.10	8.31	8.06	7.36	7.35
27	7.43	7.09	8.38	8.65	9.40	9.32	9.52	9.13	8.32	8.03	7.36	7.31
28	7.40	7.07	8.39	8.68	9.46	9.38	9.58	9.16	8.32	8.02	7.22	7.27
29	7.35	7.04	8.37	8.70	9.49	9.43	9.61	9.19	8.32	8.00	7.24	7.20
30	7.30	7.03	8.38	8.72	9.53	9.49	9.67	9.22	8.34	7.99	7.19	7.14
31	7.25	7.00	8.36	8.73	9.57	9.54	9.72	9.24	8.33	7.95	7.15	7.09
32	7.20	6.97	8.37	8.75	9.63	9.60	9.77	9.28	8.34	7.95	7.11	7.05

Tabla A.3 Coeficientes globales para usarse en la fórmula de Blanney y Criddle

CULTIVO	zonas áridas	zonas costeras
Maíz	0.75	0.85
Trigo	0.75	0.75
Algodón	0.60	0.65
Sorgo	0.70	0.70
Cártamo	0.57	0.57
Soya	0.80	0.80
Arroz	1.00	1.20
Frijol	0.60	0.70
Ajonjolín	0.70	0.75
Garbanzo	0.60	0.70
Cebada	0.75	0.75
Jitomate	0.70	0.70
Linaza	0.75	0.75
Chile	0.70	0.75
Papa	0.65	0.75
Cacahuete	0.61	0.61
Cucurbitácea	0.70	0.70
Caña	0.75	0.85
Alfalfa	0.80	0.85
Pasto	0.75	0.75
Vid	0.70	0.65
Cítricos	0.50	0.65
Frutales de hoja caduca	0.70	0.70
Frutales de hoja perenne	0.70	0.70

Los resultados obtenidos de la evapotranspiración se muestran en la Tabla A.4

Tabla A.4 Resultados obtenidos del cálculo de evapotranspiración

Mes	T °C	Valores tabla A.1	Valores tabla A.2	EVT m	EVT p $\Sigma F1$	EVT t $\Sigma F1 * CG$
Marzo	17.8	1.541	8.41	13	86	86 * 0.8=69
Abril	17.5	1.541	8.53	14		
Mayo	18.3	1.656	9.14	15		
Junio	18.5	1.656	9	15		
Julio	17.3	1.541	9.23	14		
Agosto	17.5	1.541	8.95	14		

La evapotranspiración total para este experimento fue de 69, para los meses que comprendió el experimento.

Anexo A.2

Análisis estadístico

La hipótesis nula (H_0) planteada fue que no existieron diferencias significativas entre todas las medias de las seis láminas de riego en los dos tipos de agua residual. La hipótesis alterna (H_A) planteada fue que al menos una de las medias de las láminas de riego fue diferente de las demás.

Valores de P mayores a 0.05 no mostraron diferencias significativas entre las medias y en consecuencia la hipótesis nula fue aceptada. Por su parte para los valores de P menores de 0.05 si hubieron diferencias significativas en algunas de las medias y en consecuencia la hipótesis nula fue rechazada y la hipótesis alterna fue aceptada.

Cuando se encontraron diferencias entre las medias se procedió a realizar la prueba de Duncan para conocer las medias que fueron diferentes entre las seis láminas de riego. Medias con diferente letra fueron significativamente diferentes.

A continuación se describe el análisis de varianza (ANDEVA) y la prueba de medias (cuando existieron diferencias para todos los parámetros analizados en tejido de alfalfa como en suelo).

SUELO

Nitrógeno

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	0.0005333	5	0.0001066	0.67	0.6487
Error	0.0028500	18	0.0001583		
Total	0.0033833	23			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, no se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de nitrógeno en el suelo. Por lo anterior se aceptó la hipótesis nula.

Fósforo

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	281.07	5	56.21	2.47	0.0716
Error	409.60	18	22.75		
Total	690.68	23			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, no se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de fósforo disponible en el suelo. Por lo anterior se aceptó la hipótesis nula.

Carbono orgánico

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	0.01247083	5	0.00249417	0.35	0.8760
Error	0.12832300	18	0.00714028		
Total	0.14099383	23			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, no se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de carbono en el suelo. Por lo anterior se aceptó la hipótesis nula.

Conductividad eléctrica

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	0.40832083	5	0.08166417	25.83	<0.0001
Error	0.03687300	18	0.00313972		
Total	0.46319383	23			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, si se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para la conductividad eléctrica del suelo. Por lo anterior se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alterna.

Tratamiento	Valor medio	Desviación estándar	Duncan
LA-ARC	1.61750	0.0236	A
LM-ARC	1.6050	0.0714	A
LC-ARC	1.5100	0.0616	B
LA-ARP	1.3800	0.0890	C
LM-ARP	1.3300	0.0355	CD
LC-ARP	1.2850	0.0173	D

Al comparar entre los dos tipos de agua residual todas las medias obtenidas en las tres láminas de riego con agua residual cruda fueron significativamente diferentes de las láminas de riego con agua residual parcialmente tratada. Para el agua residual cruda las láminas LA y LM fueron significativamente diferentes de LC, no así entre ellas. Para el agua residual parcialmente tratada la lámina LA fue significativamente diferente de LM y LC, no así entre estas dos.

Sodio

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	1377.003	5	275.40	19.55	<0.0001
Error	154.96	18	14.08		
Total	1531.97	23			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, si se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de sodio en la solución del suelo. Por lo anterior se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alterna.

Tratamiento	Valor medio	Desviación estándar	Duncan
LA-ARC	84.63	84.63	A
LM-ARC	84.50	84.50	A
LC-ARC	82.17	82.17	A
LA-ARP	70.37	70.73	B
LM-ARP	66.87	66.87	BC
LC-ARP	60.33	60.33	C

Al comparar entre los dos tipos de agua residual todas las medias obtenidas del contenido de sodio en la solución del suelo en las tres láminas de riego con agua residual cruda fueron significativamente diferentes de las láminas de riego con agua residual parcialmente tratada. Para el agua residual cruda no se observaron diferencias significativas entre las láminas de riego. Para el agua residual parcialmente tratada se observaron diferencias entre la lámina LA y LC, no así entre LM y LC.

Potasio

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	937.31	5	187.46	36.25	<0.0001
Error	56.88	11	5.17		
Total	994.19	16			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, si se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de potasio en la solución del suelo. Por lo anterior se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alterna.

Tratamiento	Valor medio	Desviación estándar	Duncan
LA-ARC	22.77	2.85	A
LM-ARC	20.08	0	B
LC-ARC	12.32	1.64	B
LA-ARP	33.86	2.39	C
LM-ARP	15.50	1.06	C
LC-ARP	12.92	1.06	C

Al comparar entre los dos tipos de agua residual todas las medias obtenidas del contenido de potasio en la solución del suelo en las tres láminas de riego con agua residual cruda fueron significativamente diferentes de las láminas de riego con agua residual parcialmente tratada. Para el agua residual cruda la lámina LA fue significativamente diferente de LM y LC y no se observaron diferencias entre estas últimas dos. Para el agua residual parcialmente tratada no se observaron diferencias entre las láminas de riego.

Calcio

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	504.17	5	100.83	2.02	0.1535
Error	548.49	11	49.86		
Total	1032.66	16			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, no se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de calcio disponible en el suelo. Por lo anterior se aceptó la hipótesis nula.

Magnesio

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	56.69	5	11.33	2.76	0.0747
Error	45.20	11	4,10		
Total	101.89	16			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, no se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de magnesio en el suelo. Por lo anterior se aceptó la hipótesis nula.

Cloruro

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	5005.24	5	1001.04	9.30	0.0011
Error	1183.49	11	107.59		
Total	6188.73	16			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, si se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de cloruro en la solución del suelo. Por lo anterior se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alterna.

Tratamiento	Valor medio	Desviación estándar	Duncan
LA-ARC	140.70	13.50	A
LM-ARC	132.30	5.10	AB
LC-ARC	113.75	4.65	BC
LA-ARP	95	14.07	C
LM-ARP	97.49	8.08	C
LC-ARP	113.18	14.02	BC

Al comparar entre las láminas de riego para el agua residual cruda se observaron diferencias significativas entre las medias de LA y LC. Mientras que para el agua residual parcialmente tratada no se observaron diferencias entre las láminas.

Nitratos

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	62.06	5	12.41	0.42	0.8270
Error	326.78	11	29.70		
Total	388.84	16			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, no se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de nitratos en el suelo. Por lo anterior se aceptó la hipótesis nula.

Fosfatos

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	258,286.48	5	51,657	10.09	0.0008
Error	56,303.20	11	5,188		
Total	314,589.69	16			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, si se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de fosfatos en la solución del suelo. Por lo anterior se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alterna.

Tratamiento	Valor medio	Desviación estándar	Duncan
LA-ARC	489.07	77.36	AB
LM-ARC	542.32	55.69	A
LC-ARC	228.13	35.10	C
LA-ARP	408.86	124.39	AB
LM-ARP	388.43	45	B
LC-ARP	190.09	25.84	C

Al comparar entre las láminas de riego para el agua residual cruda se observaron diferencias significativas entre la media de LA y LM con LC, no así entre ellas. El mismo comportamiento se observó para el agua residual parcialmente tratada.

Sulfatos

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F₀	Valor de P
Láminas de riego	19,085	5	3,817.12	1.46	0.2785
Error	28,753	11	2,613.96		
Total	47,839	16			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, no se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de sulfatos en el suelo. Por lo anterior se aceptó la hipótesis nula.

ALFALFA

Peso fresco

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	128.87	5	25.77	1.20	0.3472
Error	385.62	18	21.42		
Total	514.49	23			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, no se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el peso fresco del tejido de alfalfa. Por lo anterior se aceptó la hipótesis nula.

Peso seco

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	6.986	5	1.397	1.58	0.2154
Error	15.89	18	0.883		
Total	22.88	23			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, no se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el peso seco del tejido de alfalfa. Por lo anterior se aceptó la hipótesis nula.

Nitrógeno

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	0.70	5	0.14	3.95	0.014
Error	0.64	18	0.035		
Total	1.33	23			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, si se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de fosfatos en la solución del suelo. Por lo anterior se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alterna.

Tratamiento	Valor medio	Desviación estándar	Duncan
LA-ARC	3.75	0.165	A
LM-ARC	3.66	0.233	A
LC-ARC	3.48	0.180	A
LA-ARP	3.36	0.215	B
LM-ARP	3.35	0.224	B
LC-ARP	3.28	0.045	B

Al comparar entre los dos tipos de agua residual se observó que todas las láminas de riego con agua residual cruda fueron significativamente diferentes de las láminas con agua residual parcialmente tratada. No se observaron diferencias significativas entre las láminas de riego en cada tipo de agua residual.

Fósforo

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	1,272,983	5	254596.6	14.24	<0.0001
Error	321,904	18	17882.5		
Total	1,594,887	23			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, si se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de fosfatos en la solución del suelo. Por lo anterior se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alterna.

Tratamiento	Valor medio	Desviación estándar	Duncan
LA-ARC	3018.50		A
LM-ARC	3000.50		A
LC-ARC	2749.25		B
LA-ARP	2534		C
LM-ARP	2503.37		C
LC-ARP	2457.75		C

Al comparar entre los dos tipos de agua residual se observó que todas las láminas de riego con agua residual cruda fueron significativamente diferentes de las láminas con agua residual parcialmente tratada. Entre las láminas con agua residual cruda las láminas LA y LM fueron significativamente diferentes de LC y entre ellas no se observaron diferencias significativas. Para el agua residual parcialmente tratada no se observaron diferencias significativas entre las láminas de riego.

Carbono

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	15.55	5	3.11	4.73	0.0062
Error	11.84	18	0.65		
Total	27.39	23			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, si se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de fosfatos en la solución del suelo. Por lo anterior se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alterna.

Tratamiento	Valor medio	Desviación estándar	Duncan
LA-ARC	40.67	1.49	A
LM-ARC	39.55	0.59	AB
LC-ARC	38.60	0.57	BC
LA-ARP	39.82	0.57	AB
LM-ARP	39.15	0.79	BC
LC-ARP	38.22	0.28	C

Al comparar entre las láminas de riego para el agua residual cruda se observaron diferencias significativas entre la lámina LA con LC. El mismo comportamiento se observó para el agua residual parcialmente tratada.

Calcio

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	14,266,493	5	2,853,298.7	1.56	0.22
Error	32,954,052	18	1,830,780.7		
Total	47,220,547	23			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, no se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de calcio del tejido de alfalfa.

Por lo anterior se aceptó la hipótesis nula.

Potasio

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	109,890,352	5	21,978,070	3.76	0.0166
Error	105,148,079	18	5,841,559		
Total	215,038,431	23			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, si se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de potasio en la solución del suelo. Por lo anterior se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alterna.

Tratamiento	Valor medio	Desviación estándar	Duncan
LA-ARC	32,002	2754	A
LM-ARC	30,800	4430	A
LC-ARC	29,717	1881	A
LA-ARP	25,129	9743	B
LM-ARP	28,983	1436	A
LC-ARP	28,769	1131	A

Al comparar entre las láminas de riego para los dos tipos de agua residual solo el tratamiento LA con agua residual parcialmente tratada resultó ser significativamente diferente del resto de las láminas de riego.

Magnesio

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	197445	5	39489	1.42	3.2654
Error	501550	18	27863		
Total	698995	23			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, no se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de magnesio en el tejido de alfalfa. Por lo anterior se aceptó la hipótesis nula.

Azufre

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	2,003,509	5	400,701	6.65	0.0011
Error	1,084,359	18	60,242		
Total	3,087,868	23			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, si se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de azufre en la solución del suelo. Por lo anterior se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alterna.

Tratamiento	Valor medio	Desviación estándar	Duncan
LA-ARC	4,074	276	A
LM-ARC	4,095	122	A
LC-ARC	3,662	254	B
LA-ARP	3,231	262	C
LM-ARP	3,763	350	AB
LC-ARP	3,772	116	AB

Al comparar entre las láminas de riego para el agua residual cruda se observaron diferencias entre LA y LM con respecto de LC, no así entre estas dos. Para el agua residual parcialmente tratada se observaron diferencias en LA con respecto de LM y LC, no así entre estas dos.

Sodio

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	851,473	5	170,294	0.27	0.9235
Error	11,347,067	18	630,392		
Total	12,198,540	23			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, no se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de sodio en el tejido de alfalfa. Por lo anterior se aceptó la hipótesis nula.

Manganeso

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F₀	Valor de P
Láminas de riego	1,398	5	279.6	2.31	0.0867
Error	2,176	18	120.9		
Total	3,574	23			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, no se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de manganeso en el tejido de alfalfa. Por lo anterior se aceptó la hipótesis nula.

Hierro

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F₀	Valor de P
Láminas de riego	2,469,351	5	493870	1.68	0.1897
Error	5,282,234	18	293457		
Total	7,751,586	23			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, no se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de hierro en el tejido de alfalfa. Por lo anterior se aceptó la hipótesis nula.

Zinc

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F₀	Valor de P
Láminas de riego	22,814	5	4,562	2.72	0.0529
Error	30,145	18	1,674		
Total	52,959	23			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, si se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de zinc en el tejido de alfalfa. Por lo anterior se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alterna.

Tratamiento	Valor medio	Desviación estándar	Duncan
LA-ARC	184.5	33.9	A
LM-ARC	185.7	88.8	A
LC-ARC	139.5	10.8	AB
LA-ARP	126.7	26.3	AB
LM-ARP	117.7	13.6	B
LC-ARP	107.75	3.5	B

Al comparar entre las láminas de riego solo se observaron diferencias significativas entre la lámina LA y LM del agua residual cruda con respecto a las láminas LM y LC del agua residual parcialmente tratada.

Cromo

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	46.3	5	9.26	0.91	0.4955
Error	183	18	10.1		
Total	229	23			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, no se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de cobre en el tejido de alfalfa. Por lo anterior se aceptó la hipótesis nula.

Cobre

$$H_0 : \mu_{LA-ARC} = \mu_{LM-ARC} = \mu_{LC-ARC} = \mu_{LA-ARP} = \mu_{LM-ARP} = \mu_{LC-ARP}$$

$$H_A : \mu_{LA-ARC} \neq \mu_{LM-ARC} \neq \mu_{LC-ARC} \neq \mu_{LA-ARP} \neq \mu_{LM-ARP} \neq \mu_{LC-ARP}$$

Fuentes de variabilidad	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F ₀	Valor de P
Láminas de riego	332.7	5	66.5	6.68	0.0011
Error	179.2	18	9.9		
Total	511.9	23			

De acuerdo con el valor de P en el ANDEVA, si se encontraron diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de cobre en el tejido de alfalfa. Por lo anterior se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alterna.

Tratamiento	Valor medio	Desviación estándar	Duncan
LA-ARC	13.75	4.11	A
LM-ARC	12	6.37	A
LC-ARC	6.5	0.57	B
LA-ARP	5	0.81	B
LM-ARP	5.7	0.5	B
LC-ARP	3.7	0.95	B

Al comparar entre las láminas de riego, se observó que las láminas LA y LM con agua residual cruda fueron significativamente del resto de las láminas de riego.

Resultados obtenidos de los iones analizados en los lixiviados en el riego 6.

Muestreo 1								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	65.0	28.1	59.5	30.0	246.7	34.8	8.2	91.6
LM-ARC	76.2	39.1	60.5	28.7	300.4	ND	6.2	77.3
LC-ARC	65.1	26.3	63.5	27.4	262.8	ND	13.5	48.7
LA-ARP	73.1	38.5	55.0	25.9	299.3	36.2	136.7	64.1
LM-ARP	57.8	30.0	58.0	30.3	224.5	ND	81.3	24.1
LC-ARP	62.7	19.5	56.0	27.3	254.7	ND	99.4	60.5
Muestreo 2								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	65.8	29.2	59.5	17.9	249.5	ND	30.8	32.7
LM-ARC	58.3	7.8	60.5	27.2	235.7	ND	61.2	79.5
LC-ARC	87.3	29.5	63.5	25.6	378.8	37.2	83.3	23.2
LA-ARP	52.1	6.8	55.0	26.3	190.0	ND	97.6	25.3
LM-ARP	55.9	5.6	58.0	33.4	242.0	35.0	80.1	64.9
LC-ARP	58.9	3.6	56.0	24.7	234.0	35.4	73.4	36.4
Muestreo 3								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	74.9	15.1	59.5	33.2	319.9	34.3	64.0	76.5
LA-ARC	73.0	13.2	62.4	26.8	317.8	34.5	71.3	72.5
LA-ARC	73.9	14.2	61.3	29.4	319.8	35.2	67.7	74.3
LM-ARC	74.0	17.3	61.5	27.2	293.0	34.5	50.0	70.1
LM-ARC	71.3	15.4	59.8	24.1	304.2	35.5	43.4	69.9
LM-ARC	72.7	16.4	60.5	25.7	298.6	35.0	47.7	68.8
LC-ARC	77.0	34.4	62.5	22.8	305.9	36.0	54.2	69.9
LC-ARC	86.4	27.8	63.4	31.3	317.3	34.4	70.3	70.4
LC-ARC	81.7	31.1	58.1	27.0	311.6	35.2	62.3	70.2
LA-ARP	56.4	6.2	75.5	34.7	229.2	35.3	82.9	94.8
LA-ARP	62.9	3.8	84.5	31.7	200.9	34.8	43.6	43.5
LA-ARP	59.6	5.1	80.0	33.2	215.0	35.0	66.3	69.1
LM-ARP	59.2	19.2	72.5	29.8	210.1	34.7	55.0	103.5
LM-ARP	59.2	14.4	80.0	34.9	260.6	34.7	59.2	27.1
LM-ARP	59.2	16.8	76.4	32.4	235.3	34.8	57.1	83.5
LC-ARP	65.0	31.8	76.0	31.9	252.7	34.7	53.4	31.6
LC-ARP	64.9	8.3	79.5	30.9	258.5	34.5	54.0	23.0
LC-ARP	65.0	18.0	78.8	30.0	225.6	36.6	53.2	27.3
Muestreo 4								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	73.0	29.7	103.0	37.4	308.1	35.0	42.4	39.0
LA-ARC	69.5	27.5	111.5	37.4	312.6	36.0	155.5	31.6
LA-ARC	72.2	26.6	103.3	33.4	311.3	36.0	109.0	35.3
LM-ARC	75.2	36.6	64.0	34.4	311.8	34.3	45.7	42.2
LM-ARC	75.7	24.8	94.5	38.2	272.2	35.8	105.6	140.5
LM-ARC	73.5	31.7	78.3	36.3	282.0	33.1	79.6	93.3
LC-ARC	66.7	8.6	72.0	37.7	287.4	ND	76.5	104.5
LC-ARC	66.7	8.6	72.0	37.7	287.4	ND	76.5	104.5
LC-ARC	66.7	8.6	72.0	37.7	287.4	ND	76.5	104.5
LA-ARP	54.1	11.2	76.0	35.4	231.4	ND	69.6	133.4
LA-ARP	62.0	29.0	69.5	34.1	267.0	ND	90.9	127.4
LA-ARP	57.0	19.1	71.8	33.7	250.2	ND	81.2	129.4
LM-ARP	62.1	11.7	68.0	30.1	251.5	ND	109.3	109.3
LM-ARP	63.7	21.6	67.0	33.0	263.8	ND	66.2	66.2
LM-ARP	61.9	15.6	69.0	32.0	259.7	ND	88.7	89.1
LC-ARP	52.1	9.2	68.5	29.4	219.0	ND	316.2	35.7
LC-ARP	52.1	9.2	68.5	29.4	219.0	ND	316.2	35.7
LC-ARP	52.1	9.2	68.5	29.4	219.0	ND	316.2	35.7

Resultados obtenidos de los iones analizados en los lixiviados en el riego 6 (cont.).

Muestreo 5								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	74.4	20.7	100.5	34.6	316.2	ND	168.8	99.0
LA-ARC	63.0	24.7	97.0	34.8	241.3	ND	143.3	27.0
LA-ARC	69.7	23.2	99.8	34.5	258.7	ND	159.0	73.0
LM-ARC	73.6	70.0	103.0	37.1	232.9	ND	132.2	41.9
LM-ARC	118.1	50.0	86.5	37.8	434.5	ND	191.1	24.2
LM-ARC	97.8	65.0	96.8	37.5	233.7	ND	151.7	31.0
LA-ARP	52.2	9.6	86.5	34.0	197.9	ND	105.0	113.0
LA-ARP	62.4	13.6	92.5	35.8	234.8	ND	79.6	52.9
LA-ARP	55.3	12.6	90.5	34.9	215.3	ND	82.3	93.0
LM-ARP	62.1	11.7	80.5	34.6	251.5	ND	109.3	109.3
LM-ARP	63.7	21.6	92.5	34.7	263.8	ND	66.2	66.2
LM-ARP	61.9	18.6	85.5	34.5	259.6	ND	86.7	77.7
Muestreo 6								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	61.6	22.5	88.5	39.5	248.0	ND	78.0	104.4
LA-ARC	46.7	10.7	82.0	36.5	180.1	34.2	36.2	98.1
LA-ARC	53.1	14.6	84.3	37.6	208.0	ND	57.1	108.2
LM-ARC	73.5	26.7	97.5	37.9	252.3	35.1	23.6	23.6
LM-ARC	73.5	26.7	97.5	37.9	252.3	35.1	23.6	23.6
LM-ARC	73.5	26.7	97.5	37.9	252.3	35.1	23.6	23.6
LA-ARP	55.6	15.7	91.5	35.4	173.5	33.5	88.0	87.2
LA-ARP	49.7	16.2	89.5	33.1	157.5	34.5	58.5	27.0
LA-ARP	53.7	14.0	80.5	34.2	163.5	33.0	63.2	56.1
LM-ARP	61.7	20.2	100.0	29.4	234.9	ND	70.0	55.5
LM-ARP	87.7	29.7	57.5	21.1	330.8	ND	130.2	131.8
LM-ARP	73.7	23.0	76.8	24.2	282.4	ND	98.1	96.6
Muestreo 7								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	69.8	20.2	98.0	31.5	230.3	34.0	11.9	52.8
LA-ARC	61.6	10.5	93.5	24.8	236.1	35.7	41.0	35.1
LA-ARC	63.7	13.3	93.8	26.1	229.2	33.9	25.4	43.0
LA-ARP	56.4	19.1	86.5	28.2	157.8	ND	50.0	32.6
LA-ARP	50.9	8.8	78.0	30.8	178.6	ND	44.2	46.1
LA-ARP	51.7	12.9	81.2	29.5	158.2	ND	43.1	38.3
Muestreo 8								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	70.7	21.7	82.5	27.7	275.2	34.4	10.6	21.5
LA-ARC	57.1	16.6	76.5	26.3	196.4	34.4	11.6	22.5
LA-ARC	63.9	19.1	79.4	29.0	233.2	32.4	11.1	20.0
LA-ARP	61.2	26.5	85.5	26.1	212.9	34.1	43.4	23.8
LA-ARP	61.2	26.5	85.5	23.0	189.0	34.1	44.4	61.0
LA-ARP	61.2	26.5	85.5	24.6	200.9	34.1	42.9	52.4

Resultados obtenidos de los iones analizados en los lixiviados en el riego 7.

Muestreo 1								
Tratamiento	Na ⁺¹	K ⁺¹	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻¹	NO ₂ ⁻¹	NO ₃ ⁻¹	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	74.5	13.5	75.0	28.5	357.7	56.1	26.4	90.8
LA-ARC	72.8	5.7	72.5	27.6	355.3	37.5	4.1	129.9
LA-ARC	72.8	5.7	120.0	34.9	340.5	20.5	3.8	90.8
LM-ARC	79.2	8.2	86.0	33.4	379.2	34.2	3.0	217.6
LM-ARC	75.0	8.2	76.0	28.7	380.7	69.1	2.1	237.0
LM-ARC	76.7	4.2	81.0	31.0	366.2	26.5	4.6	196.5
LC-ARC	79.5	4.2	130.5	25.0	399.1	19.2	5.6	200.2
LC-ARC	71.3	1.6	92.5	31.0	325.4	19.2	6.5	215.8
LC-ARC	81.5	4.3	92.5	29.3	409.1	19.2	1.5	212.3
LA-ARP	70.8	6.7	125.0	39.6	347.7	ND	3.5	302.5
LA-ARP	59.2	5.6	117.5	27.2	347.7	ND	3.5	234.5
LA-ARP	66.7	6.0	78.0	28.5	329.7	ND	4.9	132.5
LM-ARP	66.2	4.4	59.5	37.6	322.7	ND	11.9	132.5
LM-ARP	68.2	8.1	119.5	20.1	254.4	ND	37.6	404.3
LM-ARP	68.0	7.1	75.5	28.3	242.8	ND	11.6	110.7
LC-ARP	85.9	25.8	138.5	34.2	291.3	ND	3.5	448.0
LC-ARP	81.2	14.4	160.0	30.8	321.4	ND	3.5	412.4
LC-ARP	82.8	14.4	149.3	32.5	282.7	ND	3.1	240.1
Muestreo 2								
Tratamiento	Na ⁺¹	K ⁺¹	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻¹	NO ₂ ⁻¹	NO ₃ ⁻¹	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	75.9	6.7	65.5	26.6	256.3	40.4	4.9	320.4
LA-ARC	76.7	16.6	74.0	28.7	269.2	40.4	7.6	149.3
LA-ARC	71.9	22.2	67.0	28.2	262.8	31.1	5.0	182.5
LM-ARC	76.9	9.9	65.0	26.4	286.2	64.1	11.4	322.9
LM-ARC	67.0	3.9	76.0	28.8	293.8	32.9	2.2	422.3
LM-ARC	70.9	5.9	68.5	27.4	288.0	49.5	7.9	371.6
LC-ARC	82.0	3.7	78.5	30.5	331.8	61.8	8.5	281.3
LC-ARC	89.0	2.6	75.0	27.5	343.3	34.3	11.8	404.9
LC-ARC	82.3	13.2	75.0	27.5	278.4	65.8	3.7	124.0
LA-ARP	67.5	4.4	76.5	28.9	259.9	35.8	3.7	124.0
LA-ARP	65.6	2.0	74.5	26.9	267.0	26.3	3.7	363.9
LA-ARP	66.4	4.8	74.5	26.9	275.7	23.0	22.7	240.4
LM-ARP	68.1	9.5	74.5	27.1	255.5	15.0	15.0	
LM-ARP	63.5	3.5	74.5	27.1	263.5	17.0	5.7	316.1
LM-ARP	68.7	5.3	74.5	27.1	286.4	18.0	2.5	366.4
LC-ARP	67.4	2.0	77.5	27.2	257.7	28.0	12.0	609.6
LC-ARP	84.3	3.2	77.5	27.2	328.8	12.4	7.8	698.4
LC-ARP	74.2	3.7	77.5	27.2	292.8	12.4	8.7	609.1

Resultados obtenidos de los iones analizados en los lixiviados en el riego 7 (cont.).

Muestreo 3								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	59.4	11.8	87.0	33.9	141.6	4.2	22.9	68.6
LA-ARC	74.0	16.2	83.5	30.6	185.5	7.7	15.9	90.3
LA-ARC	74.0	8.3	95.5	24.9	156.2	6.5	27.4	122.1
LM-ARC	74.0	4.8	77.5	29.3	184.5	14.5	16.4	80.7
LM-ARC	73.2	3.8	77.5	29.3	301.0	20.1	15.7	147.9
LM-ARC	56.8	2.8	77.5	29.3	220.5	54.2	18.0	173.9
LC-ARC	89.4	11.9	66.5	25.0	323.8	71.9	5.0	156.0
LC-ARC	88.1	11.0	70.5	25.0	375.1	49.2	8.4	172.7
LC-ARC	93.0	20.2	64.5	24.4	340.3	31.7	24.8	144.2
LA-ARP	78.2	7.2	79.0	28.3	162.2	ND	24.7	162.3
LA-ARP	64.3	7.2	74.5	26.8	138.1	ND	14.9	65.4
LA-ARP	67.6	16.3	80.0	26.9	157.4	ND	63.6	106.2
LM-ARP	50.6	7.5	79.5	26.2	124.4	ND	13.9	39.5
LM-ARP	69.1	12.6	102.5	31.6	147.4	ND	4.5	62.2
LM-ARP	68.0	11.5	74.5	26.4	154.8	ND	20.1	77.5
LC-ARP	73.8	15.7	67.5	25.6	182.4	ND	26.7	119.0
LC-ARP	72.1	15.7	76.0	26.9	156.1	ND	12.0	82.2
LC-ARP	73.6	15.7	70.5	24.3	167.3	ND	44.5	65.9
Muestreo 4								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	103.9	21.3	75.5	26.2	236.7	12.1	90.0	156.7
LA-ARC	76.1	15.5	64.0	23.4	176.1	5.5	90.0	156.2
LA-ARC	90.0	17.4	68.8	22.8	203.4	9.8	88.0	156.4
LM-ARC	69.2	14.2	82.0	27.2	163.4	7.0	46.0	126.4
LM-ARC	77.3	21.2	65.0	23.3	178.3	3.9	35.0	168.6
LM-ARC	73.7	15.0	65.0	23.3	159.1	18.4	35.0	132.4
LA-ARP	61.7	14.6	73.5	25.7	160.0	4.1	61.0	183.6
LA-ARP	64.9	21.2	71.5	27.1	149.6	4.1	61.0	157.9
LA-ARP	74.3	7.1	77.0	26.6	172.8	1.6	61.0	121.0
LM-ARP	67.6	11.5	72.0	25.4	147.8	6.1	59.0	93.7
LM-ARP	61.1	14.6	78.5	36.7	141.0	6.1	50.0	93.7
LM-ARP	81.7	25.0	64.0	22.8	183.9	6.1	59.0	162.7
Muestreo 5								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	71.0	19.1	75.0	28.8	174.3	ND	59.0	216.3
LA-ARC	76.1	10.7	76.5	26.0	174.3	ND	45.0	211.9
LA-ARC	68.1	10.7	73.5	25.5	158.9	ND	50.0	211.9
LM-ARC	73.1	16.8	68.5	24.8	157.7	8.5	46.0	56.7
LM-ARC	76.3	16.8	68.5	24.8	168.4	3.2	35.0	40.6
LM-ARC	79.9	18.4	68.5	24.8	175.9	3.2	35.0	41.4
LA-ARP	59.2	13.2	81.5	27.9	118.6	1.9	48.0	187.8
LA-ARP	59.2	13.2	81.5	27.9	118.6	1.9	48.0	187.8
LA-ARP	59.2	13.2	81.5	27.9	118.6	1.9	48.0	187.8
LM-ARP	69.4	20.9	74.5	20.3	158.3	1.1	42.0	128.4
LM-ARP	69.7	15.0	53.5	22.2	150.3	1.1	80.0	166.5
LM-ARP	65.7	10.3	53.5	22.2	150.3	1.1	42.0	130.1

Resultados obtenidos de los iones analizados en los lixiviados en el riego 7 (cont. 2).

Muestreo 6								
Tratamiento	Na^{+1}	K^{+1}	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Cl^{-1}	NO_2^{-1}	NO_3^{-1}	PO_4^{-3}
LA-ARC	74.3	18.1	128.5	20.3	153.7	1.1	21.0	140.3
LA-ARC	73.5	18.1	94.5	21.5	153.1	2.0	10.4	140.3
LA-ARC	69.2	18.2	94.5	21.5	152.2	4.4	19.0	181.4
LM-ARC	67.6	19.8	100.5	32.1	178.2	3.6	38.0	131.6
LM-ARC	75.2	17.7	109.5	30.4	183.4	3.6	24.0	262.8
LM-ARC	72.4	18.7	103.0	31.2	181.8	3.6	31.0	196.2
LA-ARP	61.5	7.0	101.0	35.5	154.1	6.6	58.0	167.2
LA-ARP	64.6	19.7	101.0	35.5	154.1	6.6	60.0	167.2
LA-ARP	69.9	14.6	101.0	35.5	181.1	6.6	60.0	130.8
LM-ARP	61.7	13.0	102.5	27.5	148.6	5.3	50.0	310.7
LM-ARP	68.3	11.0	172.5	29.3	170.1	5.3	30.0	272.4
LM-ARP	63.0	10.0	136.5	27.4	158.3	5.3	38.0	293.6
Muestreo 7								
Tratamiento	Na^{+1}	K^{+1}	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Cl^{-1}	NO_2^{-1}	NO_3^{-1}	PO_4^{-3}
LA-ARC	74.7	30.7	80.0	33.4	154.1	2.9	10.0	196.2
LA-ARC	68.0	15.3	129.5	31.4	158.0	2.9	30.0	46.0
LA-ARC	73.2	13.3	104.8	32.4	153.5	2.9	8.0	52.8
LA-ARP	59.4	18.8	119.0	30.9	150.3	ND	49.0	38.3
LA-ARP	63.2	18.8	113.9	31.3	138.7	ND	49.0	38.3
LA-ARP	62.3	18.8	115.4	30.1	142.5	ND	49.0	38.3

Resultados obtenidos de los iones analizados en los lixiviados en el riego 8.

Muestreo 1								
Tratamiento	Na ⁺¹	K ⁺¹	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻¹	NO ₂ ⁻¹	NO ₃ ⁻¹	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	74.5	13.5	75.0	28.5	357.7	6.5	26.4	90.8
LA-ARC	72.8	5.7	72.5	27.6	355.3	7.5	4.1	129.9
LA-ARC	72.8	5.7	120.0	34.9	340.5	8.3	3.8	90.8
LM-ARC	106.1	17.6	86.0	33.4	261.6	4.8	31.0	117.1
LM-ARC	98.5	15.2	76.0	28.7	245.3	7.5	29.4	113.2
LM-ARC	93.6	13.6	81.0	31.0	253.4	8.4	30.2	115.1
LC-ARC	90.3	8.7	130.5	25.0	221.2	5.3	52.0	168.3
LC-ARC	90.3	8.7	92.5	31.0	200.8	3.8	38.0	363.0
LC-ARC	107.4	19.1	92.5	29.3	276.0	4.0	36.0	69.3
LA-ARP	87.4	19.2	125.0	39.6	238.9	5.4	56.0	110.9
LA-ARP	77.0	11.2	117.5	27.2	198.9	4.9	50.0	139.1
LA-ARP	65.7	13.3	78.0	28.5	176.3	4.6	42.0	187.5
LM-ARP	73.9	15.0	59.5	37.6	193.3	5.8	48.0	94.3
LM-ARP	77.3	15.0	119.5	20.1	201.7	6.1	42.0	149.2
LM-ARP	84.6	15.0	75.5	28.3	212.4	6.4	53.0	118.0
LC-ARP	80.3		138.5	34.2	225.4	6.1	46.0	160.9
LC-ARP	80.5		160.0	30.8	230.2	5.6	44.0	125.4
LC-ARP	80.5		150.3	31.5	228.8	4.8	44.6	133.2
Muestreo 2								
Tratamiento	Na ⁺¹	K ⁺¹	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻¹	NO ₂ ⁻¹	NO ₃ ⁻¹	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	94.6	8.9	142.5	28.3	260.0	10.5	93.0	146.7
LA-ARC	73.8	8.9	122.0	29.5	174.1	5.8	62.0	139.7
LA-ARC	87.7	13.2	107.5	40.0	233.3	8.3	71.0	68.3
LM-ARC	89.4	13.7	128.0	50.0	257.8	9.0	51.0	135.4
LM-ARC	84.7	6.3	112.0	40.1	211.4	8.0	59.0	70.3
LM-ARC	86.1	9.5	124.5	46.2	233.6	8.9	56.0	92.9
LC-ARC	95.0	12.1	116.5	49.0	241.5	9.4	48.0	150.7
LC-ARC	92.5	21.5	120.0	30.0	239.1	9.1	39.0	86.3
LC-ARC	79.3	6.6	141.0	25.9	197.5	10.0	28.0	200.8
LA-ARP	64.9	11.6	128.5	19.2	163.6	4.3	82.0	150.4
LA-ARP	68.5	9.7	102.0	29.5	163.4	4.3	66.0	220.3
LA-ARP	76.3	9.7	76.5	36.0	202.3	4.1	77.0	195.3
LM-ARP	64.0	13.6	82.0	31.8	153.7	ND	60.0	174.5
LM-ARP	66.0	13.6	74.5	17.7	169.9	ND	62.0	173.9
LM-ARP	71.4	13.6	71.0	24.7	184.5	ND	66.0	127.7
LC-ARP	80.6	14.7	56.0	22.0	186.8	ND	65.0	187.9
LC-ARP	85.8	8.3	72.0	19.7	236.0	ND	53.0	62.8
LC-ARP	82.2	11.5	62.9	32.1	111.4	ND	58.0	123.3

Resultados obtenidos de los iones analizados en los lixiviados en el riego 8 (cont.).

Muestreo 3								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	81.5	10.7	72.0	32.6	181.7	14.6	75.0	147.2
LA-ARC	77.1	4.5	96.0	30.2	216.9	10.3	99.0	142.0
LA-ARC	78.3	8.6	55.0	26.7	198.3	13.4	86.0	143.6
LM-ARC	76.3	8.1	89.0	28.4	190.5	6.9	35.0	93.1
LM-ARC	69.8	8.1	59.5	29.0	157.7	7.7	29.0	97.0
LM-ARC	72.1	8.8	120.0	50.0	164.1	7.4	31.0	94.0
LC-ARC	85.3	8.5	81.0	32.1	229.3	7.2	85.0	98.6
LC-ARC	83.9	16.9	61.5	23.6	229.3	6.4	85.0	98.6
LC-ARC	88.1	16.8	104.0	33.9	229.3	11.4	85.0	98.6
LA-ARP	63.1	16.2	83.0	34.6	212.2	8.7	100.0	47.1
LA-ARP	85.0	16.2	78.0	27.0	212.2	8.7	100.0	47.1
LA-ARP	75.1	16.2	57.0	21.5	212.2	8.7	100.0	47.1
LM-ARP	103.2	20.6	113.5	21.9	283.6	8.4	111.0	96.3
LM-ARP	79.7	9.9	91.5	28.4	201.0	8.6	82.0	119.4
LM-ARP	85.6	2.4	76.0	31.5	218.6	4.9	92.0	85.0
LC-ARP	82.1	6.8	69.0	18.2	215.1	5.2	65.0	82.5
LC-ARP	81.6	6.8	78.0	27.9	201.9	4.8	57.0	97.6
LC-ARP	80.9	6.6	91.5	26.1	209.5	5.0	62.0	91.0
Muestreo 4								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	84.7	14.4	85.5	21.7	185.9	10.8	26.8	84.9
LA-ARC	81.7	11.5	70.5	31.9	182.6	11.6	22.3	86.4
LA-ARC	83.5	10.1	74.0	30.1	181.4	9.9	24.6	84.4
LM-ARC	84.9	12.7	87.0	21.0	191.4	11.2	21.6	26.1
LM-ARC	70.3	12.7	92.5	22.2	190.0	17.5	51.5	71.8
LM-ARC	78.6	12.7	90.8	22.6	191.7	15.4	35.6	51.0
LA-ARP	63.2	4.3	93.5	25.9	143.5	6.7	58.1	64.5
LA-ARP	77.5	9.2	73.5	29.0	200.5	6.7	77.9	41.8
LA-ARP	71.4	7.8	45.5	23.8	180.0	5.5	69.0	52.1
LM-ARP	66.5	8.3	54.5	27.7	164.0	6.4	36.6	22.3
LM-ARP	66.2	2.0	80.0	31.5	162.7	6.4	38.8	44.0
LM-ARP	66.5	6.2	68.5	29.0	161.4	6.4	37.7	34.2
Muestreo 5								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	81.5	10.7	57.5	30.2	221.5	ND	75.9	135.7
LA-ARC	77.0	8.2	98.0	31.3	176.2	ND	79.2	156.3
LA-ARC	80.3	9.5	70.5	28.9	190.8	ND	78.6	149.0
LM-ARC	71.3	5.7	72.0	20.5	174.5	ND	51.7	38.6
LM-ARC	88.2	14.8	46.0	20.6	241.7	ND	20.3	48.0
LM-ARC	78.8	9.2	59.5	20.6	208.1	ND	35.0	42.3
LA-ARP	63.5	9.9	92.5	25.9	140.9	ND	58.3	129.1
LA-ARP	66.7	6.5	72.5	29.0	178.4	ND	70.9	182.0
LA-ARP	65.1	8.2	44.5	23.8	159.7	ND	64.6	155.6
LM-ARP	73.1	18.9	53.5	27.7	169.2	ND	56.1	117.6
LM-ARP	83.1	18.0	79.0	31.5	237.5	ND	42.6	121.5
LM-ARP	78.1	18.4	65.5	29.0	203.3	ND	49.3	119.5

Resultados obtenidos de los iones analizados en los lixiviados en el riego 8 (cont. 2).

Muestreo 6								
Tratamiento	Na^{+1}	K^{+1}	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Cl^{-1}	NO_2^{-1}	NO_3^{-1}	PO_4^{-3}
LA-ARC	93.5	15.5	127.0	25.0	221.5	ND	75.9	135.7
LA-ARC	80.9	14.7	136.5	16.6	205.1	ND	65.3	90.7
LA-ARC	82.5	29.6			181.0	ND	12.0	81.0
LA-ARP	76.9	15.1	137.0	29.8	175.9	4.5	36.6	122.2
LA-ARP	76.9	15.1	137.0	29.8	175.9	4.5	36.6	122.2
LA-ARP	76.9	15.1	137.0	29.8	175.9	4.5	36.6	122.2
Muestreo 7								
Tratamiento	Na^{+1}	K^{+1}	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Cl^{-1}	NO_2^{-1}	NO_3^{-1}	PO_4^{-3}
LA-ARC	86.8	18.9	70.5	23.7	204.9	15.6	38.0	117.4
LA-ARC	83.8	14.3	79.0	26.2	173.5	11.4	35.5	112.5
LA-ARC	85.3	16.6	74.8	24.9	189.2	13.5	36.7	115.0
LA-ARP	73.6	23.6	74.5	23.6	175.9	4.5	36.6	122.2
LA-ARP	62.6	12.5	82.5	25.5	139.0	4.5	19.6	103.1
LA-ARP	68.1	18.1	78.5	24.5	157.4	4.5	28.1	112.6

Resultados obtenidos de los iones analizados en los lixiviados en el riego 9.

Muestreo 1								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	70.6	44.0	92.0	16.1	207.3	13.7	49.0	389.6
LA-ARC	83.4	12.0	97.0	20.2	223.7	4.6	48.0	156.6
LA-ARC	89.5	11.5	96.0	19.2	198.1	6.3	53.0	144.6
LM-ARC	82.5	8.9	78.0	22.5	222.9	8.4	45.0	99.9
LM-ARC	69.2	8.0	103.0	27.7	199.1	7.6	43.0	149.5
LM-ARC	71.6	13.5	102.7	23.7	188.1	5.2	42.0	142.7
LC-ARC	113.1	12.9	31.0	10.3	306.7	9.0	58.0	69.5
LC-ARC	54.0	1.4	111.5	13.0	125.0	3.7	28.0	93.7
LC-ARC	87.3	7.9	111.5	13.0	226.1	10.2	42.0	110.4
LA-ARP	70.8	14.0	43.5	16.1	193.8	5.6	67.0	129.2
LA-ARP	85.6	14.0	109.5	16.1	238.9	5.1	90.0	113.7
LA-ARP	68.7	14.7	109.5	18.5	197.1	5.1	52.0	131.2
LM-ARP	82.3	17.4	82.5	17.9	217.4	ND	72.0	139.5
LM-ARP	69.9	6.4	81.5	17.9	185.0	ND	50.0	127.3
LM-ARP	60.0	7.0	81.5	8.9	163.4	ND	49.0	176.9
LC-ARP	73.5	6.3	63.0	22.0	202.8	ND	55.0	139.1
LC-ARP	67.1	6.3	53.0	21.6	156.6	ND	52.0	123.2
LC-ARP	71.3	6.2	59.0	21.7	180.7	ND	52.5	130.2
Muestreo 2								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	77.5	8.7	57.0	21.2	209.4	7.2	65.0	163.3
LA-ARC	86.4	12.0	97.0	20.2	223.7	4.6	48.0	156.6
LA-ARC	86.4	12.0	97.0	20.2	190.1	2.3	63.0	145.6
LM-ARC	77.0	17.3	101.0	21.6	205.1	3.8	45.0	137.8
LM-ARC	62.2	7.0	103.0	27.7	189.1	8.6	43.0	149.5
LM-ARC	70.6	13.2	102.7	23.7	198.1	5.2	42.0	142.7
LC-ARC	74.6	12.4	56.0	20.9	189.5	6.7	48.0	126.0
LC-ARC	85.4	14.3	129.0	27.7	237.3	8.7	58.0	142.9
LC-ARC	86.1	14.7	86.3	25.5	219.1	4.9	39.0	131.9
LA-ARP	50.9	3.9	80.5	30.8	154.0	ND	93.0	163.6
LA-ARP	65.0	3.9	111.5	16.7	139.7	ND	65.0	140.1
LA-ARP	61.0	3.9	95.0	24.8	147.9	ND	80.0	152.7
LM-ARP	70.9	13.9	57.5	23.9	193.9	ND	65.0	198.6
LM-ARP	59.8	13.9	102.5	33.9	154.6	ND	73.0	139.3
LM-ARP	67.4	13.9	82.0	30.9	176.3	ND	67.0	166.9
LC-ARP	73.5	6.3	59.0	20.6	202.8	ND	55.0	139.1
LC-ARP	67.1	6.3	105.5	13.7	156.6	ND	52.0	123.2
LC-ARP	71.3	6.3	72.3	16.1	182.7	ND	54.5	130.2

Resultados obtenidos de los iones analizados en los lixiviados en el riego 9 (cont.).

Muestreo 3								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	80.6	23.7	59.0	23.9	174.3	10.7	73.0	57.6
LA-ARC	81.3	23.7	68.5	21.2	215.5	7.7	69.0	71.6
LA-ARC	70.3	14.6	46.0	33.1	159.1	12.0	34.0	94.1
LM-ARC	82.7	19.3	119.5	24.6	199.2	11.0	44.0	42.5
LM-ARC	88.2	19.3	61.0	25.6	193.2	8.2	43.0	89.3
LM-ARC	75.1	19.3	61.0	25.6	164.9	14.8	40.0	71.2
LC-ARC	85.6	13.4	60.0	25.4	209.3	7.4	44.0	36.6
LC-ARC	89.3	13.4	108.5	23.7	218.3	10.7	46.0	152.9
LC-ARC	86.5	13.4	94.3	24.1	210.8	8.0	43.0	98.7
LA-ARP	64.0	9.7	77.5	18.5	125.5	6.2	85.0	32.6
LA-ARP	79.5	20.9	58.5	29.4	203.9	6.2	79.0	120.5
LA-ARP	70.8	13.3	66.0	22.9	161.7	6.2	81.0	86.6
LM-ARP	64.2	9.3	96.5	24.9	138.5	3.5	64.0	26.2
LM-ARP	65.2	16.6	89.5	26.6	153.6	8.5	60.0	42.6
LM-ARP	64.6	11.9	92.0	25.0	148.1	7.0	63.0	36.4
LC-ARP	73.5	6.3	109.5	21.2	202.8	9.3	55.0	139.1
LC-ARP	67.1	6.3	109.5	21.0	156.6	9.3	52.0	123.2
LC-ARP	71.3	6.3	108.5	23.0	180.7	9.3	51.5	130.2
Muestreo 4								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	101.1	28.0	47.0	14.1	259.4	6.0	51.0	122.7
LA-ARC	98.1	21.4	58.5	28.2	266.4	13.9	48.0	55.8
LA-ARC	99.5	23.7	50.8	19.1	260.9	10.9	50.5	99.2
LM-ARC	80.4	18.7	85.0	20.5	178.1	9.4	56.0	81.0
LM-ARC	86.2	19.3	61.0	25.6	193.2	8.2	43.0	89.3
LM-ARC	76.1	17.4	61.0	25.6	163.9	13.8	40.0	71.2
LA-ARP	93.5	15.7	97.0	20.8	250.6	ND	93.0	35.9
LA-ARP	63.3	13.3	60.5	18.5	147.6	ND	68.0	107.4
LA-ARP	78.4	14.1	78.8	19.6	199.1	ND	80.5	71.7
LM-ARP	71.6	8.1	78.5	10.6	263.7	ND	50.0	112.2
LM-ARP	69.1	12.8	76.5	15.6	141.4	ND	36.0	28.8
LM-ARP	71.4	10.5	77.4	12.1	182.5	ND	45.0	80.3
Muestreo 5								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	82.3	8.8	56.5	23.3	210.3	2.6	49.0	62.3
LA-ARC	82.3	8.8	74.0	18.7	210.1	7.0	43.0	85.5
LA-ARC	80.3	8.8	67.3	19.9	210.2	5.8	45.0	75.9
LM-ARC	79.1	23.3	71.0	19.9	178.0	3.6	32.0	63.5
LM-ARC	81.5	9.6	59.0	17.4	169.3	6.5	34.0	61.3
LM-ARC	78.6	8.4	63.0	15.9	164.4	5.3	38.0	60.5
LA-ARP	66.7	9.2	80.0	17.9	146.6	ND	45.0	39.6
LA-ARP	70.2	10.7	125.5	31.5	168.1	ND	60.0	90.8
LA-ARP	67.4	9.9	103.8	25.7	159.3	ND	50.5	55.2
LM-ARP	64.3	64.3	108.0	31.7	169.6	6.0	60.0	63.4
LM-ARP	67.2	67.2	103.2	21.7	184.7	6.3	69.0	101.9
LM-ARP	62.6	62.6	98.4	18.4	137.1	6.5	36.0	112.6

Resultados obtenidos de los iones analizados en los lixiviados en el riego 9 (cont. 2).

Muestreo 6								
Tratamiento	Na^{+1}	K^{+1}	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Cl^{-1}	NO_2^{-1}	NO_3^{-1}	PO_4^{-3}
LA-ARC	113.8	23.6	87.5	28.2	231.4	6.4	78.0	106.9
LA-ARC	64.8	13.6	104.5	39.0	125.3	6.4	56.4	289.6
LA-ARC	58.2	6.3	104.5	39.0	108.2	4.9	12.0	65.4
LA-ARP	67.4	6.2	108.5	37.1	152.6	ND	31.4	68.3
LA-ARP	51.5	2.7	108.5	35.9	116.3	ND	26.6	56.9
LA-ARP	57.5	5.5	106.5	34.9	130.4	ND	30.0	60.6
Muestreo 7								
Tratamiento	Na^{+1}	K^{+1}	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Cl^{-1}	NO_2^{-1}	NO_3^{-1}	PO_4^{-3}
LA-ARC	113.8	23.6	87.5	28.2	231.4	6.4	78.0	106.9
LA-ARC	64.8	13.6	104.5	39.0	125.3	6.4	56.4	289.6
LA-ARC	58.2	6.3	104.5	39.0	108.2	4.9	12.0	65.4
LA-ARP	67.4	6.2	108.5	37.1	152.6	ND	31.4	68.3
LA-ARP	51.5	2.7	108.5	35.9	116.3	ND	26.6	56.9
LA-ARP	57.5	5.5	106.5	34.9	130.4	ND	30.0	60.6

Resultados obtenidos de los iones analizados en los lixiviados en el riego 10.

Muestreo 1								
Tratamiento	Na ⁺¹	K ⁺¹	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻¹	NO ₂ ⁻¹	NO ₃ ⁻¹	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	72.5	4.0	106.5	35.6	327.4	11.7	59.5	178.8
LA-ARC	72.5	4.0	88.0	34.9	248.7	11.7	43.0	178.8
LA-ARC	82.7	25.0	97.5	31.6	357.3	35.1	50.7	179.1
LM-ARC	77.6	27.1	99.5	25.1	307.9	34.4	26.0	174.8
LM-ARC	59.4	6.7	76.0	34.3	257.2	34.4	25.2	106.7
LM-ARC	67.5	14.9	86.8	28.7	286.5	32.4	25.4	138.8
LC-ARC	57.8	24.0	89.0	36.4	156.3	2.5	32.0	115.2
LC-ARC	90.2	7.4	76.5	31.3	161.2	2.5	40.0	108.0
LC-ARC	90.4	9.0	110.0	37.4	238.9	7.2	49.0	119.9
LA-ARP	64.0	14.6	79.0	33.2	161.2	4.9	60.0	46.3
LA-ARP	66.3	14.6	79.0	34.8	168.4	4.9	55.0	100.1
LA-ARP	73.7	11.1	109.0	38.4	209.3	4.9	49.0	91.5
LM-ARP	61.0	11.3	78.5	35.3	178.2	7.7	61.0	54.8
LM-ARP	72.3	4.4	69.0	28.9	185.6	7.7	53.0	50.8
LM-ARP	77.0	7.0	92.0	33.1	229.8	7.7	61.0	56.2
LC-ARP	105.7	30.1	95.0	33.6	275.2	2.6	53.0	96.6
LC-ARP	90.2	21.2	79.5	30.6	252.4	2.6	74.0	106.4
LC-ARP	89.8	12.8	80.0	31.2	242.7	2.6	56.0	161.2
Muestreo 2								
Tratamiento	Na ⁺¹	K ⁺¹	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻¹	NO ₂ ⁻¹	NO ₃ ⁻¹	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	74.6	7.0	118.5	50.0	196.2	10.1	89.0	124.2
LA-ARC	64.7	7.0	85.0	30.8	167.3	8.6	54.0	150.4
LA-ARC	61.2	4.3	80.0	32.6	162.4	9.0	64.0	164.2
LM-ARC	63.1	6.2	89.0	29.3	231.9	9.0	65.0	144.6
LM-ARC	63.1	6.2	86.0	30.9	158.3	8.9	67.0	188.7
LM-ARC	88.6	14.9	92.0	30.5	221.2	8.5	62.0	173.8
LC-ARC	113.3	25.0	88.5	29.0	284.9	9.7	100.0	62.8
LC-ARC	80.9	9.1	89.0	30.7	213.3	7.7	64.0	32.9
LC-ARC	65.5	3.7	74.5	27.7	185.7	7.9	92.0	161.6
LA-ARP	69.5	4.8	110.0	27.5	196.5	ND	109.0	139.3
LA-ARP	69.5	4.8	110.0	27.5	196.5	ND	109.0	139.3
LA-ARP	69.5	4.8	110.0	27.5	196.5	ND	109.0	139.3
LM-ARP	76.3	13.3	108.0	40.0	208.2	ND	65.0	93.9
LM-ARP	77.0	13.3	84.5	23.5	207.3	ND	81.0	93.9
LM-ARP	83.9	22.8	77.5	25.7	207.3	ND	81.0	93.9
LC-ARP	65.7	13.7	105.0	26.1	188.9	ND	62.0	35.5
LC-ARP	83.8	21.4	71.0	23.8	210.3	ND	88.0	282.6
LC-ARP	73.7	18.5	91.1	22.9	197.6	ND	74.0	89.1

Resultados obtenidos de los iones analizados en los lixiviados en el riego 10 (cont.).

Muestreo 3								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	78.3	9.5	90.0	26.0	191.1	10.0	93.0	122.9
LA-ARC	69.4	13.3	110.0	45.0	170.1	9.2	79.0	110.8
LA-ARC	60.4	13.3	75.0	34.6	139.1	4.8	39.0	59.2
LM-ARC	77.1	10.2	72.0	28.6	199.7	11.8	55.0	79.4
LM-ARC	60.8	9.7	85.5	35.0	157.0	8.1	42.0	123.9
LM-ARC	96.3	7.9	113.5	42.5	233.5	17.5	78.0	146.6
LC-ARC	85.3	17.5	74.5	28.4	108.6	8.7	39.0	40.4
LC-ARC	76.2	7.0	107.5	30.4	194.5	12.8	65.0	94.2
LC-ARC	69.9	3.8	75.0	27.9	173.3	11.6	30.0	97.4
LA-ARP	52.2	5.6	107.0	38.2	126.1	6.8	65.0	125.2
LA-ARP	58.2	5.2	78.0	26.1	136.8	6.5	62.0	125.2
LA-ARP	54.2	5.4	91.5	33.2	130.5	6.6	64.5	125.2
LM-ARP	71.4	7.0	88.0	30.3	178.9	7.1	55.0	56.4
LM-ARP	68.0	14.1	101.5	39.0	168.7	7.1	53.0	97.7
LM-ARP	68.3	6.5	88.5	31.8	180.0	4.3	53.0	96.9
LC-ARP	78.0	7.9	73.5	24.6	191.4	2.7	55.0	105.8
LC-ARP	66.1	6.4	74.5	24.9	166.2	5.1	53.0	121.6
LC-ARP	71.0	6.1	74.0	23.7	176.8	3.5	44.0	113.7
Muestreo 4								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	61.5	3.9	82.5	28.3	191.4	5.0	68.8	38.1
LA-ARC	79.7	13.3	76.0	30.3	166.2	6.6	68.8	19.3
LA-ARC	68.6	7.6	80.3	27.5	177.4	5.7	68.8	29.7
LM-ARC	107.4	30.0	96.5	34.2	288.2	16.8	89.1	105.3
LM-ARC	87.4	18.9	96.5	34.2	254.7	13.2	37.2	16.5
LM-ARC	96.4	23.4	96.5	32.2	272.5	17.0	65.2	58.4
LC-ARC	84.5	11.6	107.5	30.4	241.7	19.0	70.5	71.0
LC-ARC	102.0	9.0	75.0	27.9	253.3	20.8	51.7	99.8
LC-ARC	92.3	10.4	89.3	28.1	245.5	18.9	63.1	85.4
LA-ARP	139.7	60.9	107.0	38.2	270.7	12.3	125.3	55.2
LA-ARP	217.2	97.5	78.0	26.1	167.5	12.3	21.1	17.5
LA-ARP	168.3	78.2	91.5	30.2	200.1	12.3	53.2	35.4
LM-ARP	147.1	52.7	88.0	30.3	358.1	8.9	98.7	66.0
LM-ARP	137.0	37.2	101.5	39.0	342.6	15.0	122.8	106.2
LM-ARP	140.0	46.0	95.8	36.6	351.3	11.0	111.7	90.1
LC-ARP	111.3	ND	73.5	24.6	257.4	7.5	69.5	68.8
LC-ARP	148.6	ND	74.5	24.9	392.7	7.5	98.5	28.3
LC-ARP	131.0	ND	74.0	24.4	320.1	7.5	83.0	50.5
Muestreo 5								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	141.9	14.9	102.5	37.0	357.3	13.6	18.9	77.5
LA-ARC	145.3	44.3	82.5	27.6	262.6	21.2	65.6	67.7
LA-ARC	148.5	19.0	69.5	26.6	262.6	21.2	65.6	67.7
LM-ARC	114.9	49.3	77.0	27.8	419.6	76.4	91.1	290.6
LM-ARC	143.4	49.3	77.0	27.8	318.5	71.7	86.7	283.3
LM-ARC	130.1	49.3	77.0	27.8	359.0	75.1	89.4	288.0
LA-ARP	99.1	13.9	125.0	45.0	392.9	75.9	88.5	283.6
LA-ARP	93.3	11.3	71.5	22.4	364.7	73.3	86.8	284.2
LA-ARP	97.2	13.0	100.3	34.7	380.2	72.6	85.6	281.9
LM-ARP	115.7	11.9	65.5	22.2	333.7	70.6	90.8	284.8
LM-ARP	127.2	11.9	76.5	25.3	335.6	70.6	86.8	283.0
LM-ARP	120.5	11.9	70.0	24.7	334.8	70.6	89.8	283.8

Resultados obtenidos de los iones analizados en los lixiviados en el riego 10 (cont. 2).

Muestreo 6								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	138.1	35.1	99.0	34.1	311.6	ND	87.6	142.9
LA-ARC	129.2	35.1	83.0	30.1	504.8	ND	87.6	181.5
LA-ARC	132.6	35.1	90.0	33.1	400.2	ND	87.6	160.2
LM-ARC	131.5	16.1	65.5	22.2	582.2	ND	141.4	218.2
LM-ARC	121.6	11.1	76.5	25.3	481.3	ND	90.1	141.0
LM-ARC	126.5	14.6	72.0	23.4	530.8	ND	120.7	180.6
LA-ARP	99.1	13.9	125.0	45.0	392.9	75.9	88.5	283.6
LA-ARP	93.3	11.3	71.5	22.4	364.7	73.3	86.8	284.2
LA-ARP	97.2	13.0	100.3	34.7	380.2	72.6	85.6	281.9
LM-ARP	115.7	11.9	65.5	22.2	333.7	70.6	90.8	284.8
LM-ARP	127.2	11.9	76.5	25.3	335.6	70.6	86.8	283.0
LM-ARP	120.5	11.9	70.0	24.7	334.8	70.6	89.8	283.8
Muestreo 7								
Tratamiento	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³
LA-ARC	142.5	53.0	83.0	34.9	539.5	70.1	86.7	143.5
LA-ARC	130.1	10.1	81.0	35.0	382.9	70.1	91.9	142.8
LA-ARC	135.6	18.5	79.0	33.1	416.7	70.1	89.3	141.6
LA-ARP	115.1	14.0	75.5	25.4	386.9	ND	87.3	146.7
LA-ARP	115.1	14.0	75.5	25.4	386.9	ND	87.3	146.7
LA-ARP	115.1	14.0	75.5	25.4	386.9	ND	87.3	146.7

Resultados obtenidos de los elementos analizados en el tejido de alfalfa

Tratamiento	C (%)	N (%)	S (g/kg)	Ca (g/kg)	K (g/kg)	Mg (g/kg)	Na (g/kg)	Mn (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Zn (mg/kg)	P (g/kg)	Cu (mg/kg)
LA-ARC	42.3	3.96	4.15	13.58	34.61	2.96	4.08	78	958	163	2.97	10
LA-ARC	41.36	3.81	4.33	14.68	34.02	3.01	3.65	87	1526	166	3.17	15
LA-ARC	40.33	3.63	4.14	14.42	28.90	3.24	4.97	105	2529	235	2.83	19
LA-ARC	38.87	3.61	3.68	13.73	30.49	3.30	4.28	118	2746	174	3.04	11
LM-ARC	39.24	3.88	4.22	17.56	32.73	3.31	3.49	114	2556	126	3.07	10
LM-ARC	40.4	3.72	4.12	14.18	33.33	3.21	4.45	98	1882	173	3.15	11
LM-ARC	39.18	3.33	3.93	13.26	24.16	3.33	6.42	101	3065	315	2.71	21
LM-ARC	39.53	3.71	4.12	17.27	32.97	3.24	4.21	109	2351	129	3.14	14
LC-ARC	38.65	3.54	3.61	15.41	28.41	3.25	4.10	116	2953	129	2.64	7
LC-ARC	39.11	3.24	3.49	14.46	28.77	3.53	4.76	121	3113	145	2.69	6
LC-ARC	38.98	3.67	4.04	14.49	32.50	3.22	4.01	119	2588	132	2.85	6
LC-ARC	37.81	3.49	3.52	13.75	29.19	3.34	4.90	124	3393	152	2.82	7
LA-ARP	39.34	3.56	3.07	18.16	25.12	3.39	4.47	130	2152	116	2.33	4
LA-ARP	39.58	3.08	2.96	18.20	25.42	3.45	3.39	111	2450	103	2.54	5
LA-ARP	39.96	3.28	3.54	16.02	26.16	3.47	4.06	118	2476	124	2.59	5
LA-ARP	40.67	3.48	3.35	13.72	23.82	3.28	6.20	103	2191	164	2.68	6
LM-ARP	39.95	3.69	4.25	15.87	30.84	3.76	4.64	127	2563	131	2.63	6
LM-ARP	39.62	3.29	3.80	15.15	29.38	3.25	4.56	105	2114	128	2.47	6
LM-ARP	38.16	3.19	3.49	14.73	27.99	3.24	3.97	113	2422	106	2.43	5
LM-ARP	39.05	3.27	3.52	14.66	27.72	3.30	3.69	116	2458	106	2.49	6
LC-ARP	38.67	3.28	3.80	14.75	28.90	3.34	4.35	119	2496	112	2.34	5
LC-ARP	38.31	3.23	3.93	16.16	29.85	3.42	4.24	122	3549	106	2.52	3
LC-ARP	38.06	3.3	3.67	14.47	29.14	3.00	4.05	97	1615	109	2.49	3
LC-ARP	38.06	3.34	3.70	15.90	27.18	3.50	3.81	114	2705	104	2.49	4

Caracterización del suelo con respecto a los nutrientes, materia orgánica y sales

Tratamiento	Materia orgánica	Nitrógeno total	P olsen	Cond. eléctrica
	(%)	(%)	(mg/kg)	(mS/cm)
LA-ARC	5.65	0.330	61	1.60
LA-ARC	5.57	0.330	67	1.63
LA-ARC	5.62	0.320	64	1.60
LA-ARC	5.58	0.330	66	1.65
LM-ARC	5.69	0.330	63	1.65
LM-ARC	5.69	0.330	57	1.50
LM-ARC	5.41	0.320	63	1.63
LM-ARC	5.62	0.330	63	1.65
LC-ARC	5.30	0.290	58	1.55
LC-ARC	5.58	0.310	56	1.53
LC-ARC	5.65	0.330	56	1.43
LC-ARC	5.51	0.340	68	1.55
LA-ARP	5.53	0.320	67	1.25
LA-ARP	5.44	0.320	51	1.40
LA-ARP	5.57	0.330	56	1.45
LA-ARP	5.74	0.340	56	1.43
LM-ARP	5.69	0.310	56	1.35
LM-ARP	5.46	0.330	55	1.30
LM-ARP	5.53	0.310	60	1.38
LM-ARP	5.56	0.320	63	1.30
LC-ARP	5.72	0.320	61	1.30
LC-ARP	5.71	0.340	51	1.28
LC-ARP	5.36	0.340	52	1.28
LC-ARP	5.22	0.310	49	1.30

Caracterización del suelo con base en los iones mayoritarios

Tratamiento	Na^+	K^+	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{-2}
LA-ARC	83	26	77	28	127	10	106
LA-ARC	86	20	65	27	154	12	233
LA-ARC	85	23	70	28	141	11	169
LM-ARC	86	20	74	30	127	4	106
LM-ARC	83	18	88	33	137	26	309
LM-ARC	85	16	81	31	132	15	207
LC-ARC	80	14	81	30	118	15	198
LC-ARC	84	11	66	27	109	11	194
LC-ARC	82	12	56	25	114	13	196
LA-ARP	63	31	72	30	83	12	201
LA-ARP	78	36	69	24	110	9	201
LA-ARP	70	34	74	27	92	11	201
LM-ARP	63	13	68	32	89	10	217
LM-ARP	70	19	78	29	105	21	221
LM-ARP	68	14	73	31	99	16	221
LC-ARP	61	14	63	28	103	14	112
LC-ARP	59	12	61	26	123	11	101
LC-ARP	60	14	61	27	115	12	106

Bibliografía

Abbott, C. y Hasnip, N. (1997) **The safe use of marginal quality water in agriculture**. En línea: www.gtz.de/ecosan/download/DFID-guide-qualitywater.pdf. Fecha de consulta: diciembre de 2005.

APHA, AWWA y WEF (1998) **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation. 20va. Edición. Washington DC. Estados Unidos de América.

Addiscott, T. y Thomas, D. (2000) **Tillage, mineralization and leaching: phosphate**. *Soil & Tillage Res.*, 53, 255-273

Angelakis, A. Koutsoyiannis, D. y Tchobanoglous, G. (2005) **Urban wastewater and stormwater technologies in ancient Greece**. *Water Res.*, 39, 210-220.

Antón, D. y Delgado, C. (2000) **Sequía en un mundo de agua**. Editorial Cira. Costa Rica.

Asano y Takashi. (1991) **Planning and implementation of water reuse projects** *Water Sci. Tech.*, 24: 9, 1-10.

Bergmann, W. (1986) **Farbatlas Ernährungsstorungen. Bei Kulturpflanzen. Visuelle und analytische diagnose**. VEB Gustav Fischer Verlag Jena

Blake-Kalff, M.; Hawkesford, M.; Zhao, F. y McGrath, S. (2000) **Diagnosing sulfur deficiency in field-grown oilseed rape (*Brassica napus* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.)** *plant and soil*, 225, 95-107.

Bouwer, H y Rice, A. (1992) **Agricultural and municipal use of wastewater**. *Water Sci. Tech.* 26:7-8, 1583-1591.

Boylston, M y Beer, D. (2002) **Methemoglobinemia: A Case Study**. *Critical Care Nurse*. 22, 50-55

Bradford, A.; Brook, R. y Hunshal, C. (2002) **Reducción de Riesgos del uso de aguas residuales para la agricultura**. En línea: <http://www.ipes.org/au/pdfs/rau6/AU6%20Reduccion%20de%20riesgos.pdf>. Fecha de consulta: octubre de 2005.

Brady, C. (2002) **The nature and properties of soils**. décimo tercera edición. Editorial Prentice Hall. pp 413-441, 498-539, 544-586, 639-667.

Brissaud, F. (2006) **Memorias del curso "Soil Treatment of Wastewater"**. México, D. F. pp. 4-7.

BGS, (1998) **"Impact of wastewater reuse on groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State, Mexico"**, reporte final para British Geological Survey.

Cantú, M y Garduño, H. (2004) **Administración de derechos de agua, experiencias, asuntos relevantes y lineamientos**. Anexo 2. Oficina jurídica de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. pp.107-129

- Chardon, W.; Aalderink, G. y Van der Salm, C. (2007) **Phosphorus leaching from cow manure patches on soil columns**, *J. Environ. Qual.*; 36, 1 pg. 17
- Chávez, A. (2004) **Optimización del tratamiento primario avanzado vía distribución del tamaño de partícula**. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Chung, J.; Kim, S.; Jeong, B. y Lee, Y. (2004) **Removal of organic matter and nitrogen from river water in a model floodplain**. *J. Environ. Qual.*, 33, 1017-1023.
- Cifuentes, E.; Gómez, M.; Blumenthal, U.; Tellez, M.; Romieu, I.; Ruiz, G. y Ruiz, S. (2000) **Risk factors for *giardia intestinalis* infection in agricultural villages practicing wastewater irrigation in México**. *am. j. trop. med. hyg.*, 62:3, 388-392
- Contreras, M. y Martínez, R. (1996) **Relaciones agua-suelo-plantas-atmósfera**. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México.
- CNA, (2005). **Relación de cultivos por emprender en el Distrito de Riego 003: Tula, Hidalgo para el ciclo agrícola 2005-2006**.
- Downs, T.; Cifuentes E.; Edgard, R. y Suffett, M. (2000) **Effectiveness of natural treatment in a wastewater irrigation district of the Mexico City Region: Asynoptic field survey**. *Water Res.* 72: 1, 4-21.
- Driederik, T., Breeuwsma, A., Boers, P. (1998). **Agricultural nutrient losses to surface water in the Netherlands impact, strategies and perspectives**. *J. Environ. Qual.*, 27, 1.
- Esteller, M. (2002) **Vulnerabilidad de acuíferos frente al uso de aguas residuales y lodos en agricultura**. *Revista latino-americana de Hidrogeología*, 2, 103-113.
- Escalante, V.; Cardoso, L.; Ramírez, E.; Moeller, G.; Mantilla, G.; Montecillos, J.; Servín, C. y Villavicencio, F. (2002) **El reuso del agua residual tratada en México. Seminario internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales**. IMTA. Cuernavaca, Morelos.
- FAO, (1992). **Wastewater treatment and use in agriculture** - FAO irrigation and drainage paper 47 En línea: <http://www.fao.org/docrep/T0551E/t0551e00.htm#Contents>. Fecha de consulta. Noviembre de 2005.
- Foster, S. y Chilton, P. (2003) **Groundwater: The Processes and Global Significance of Aquifer Degradation**. *Phil. Trans. R. Soc. Lond B.*, 358, 1957-1972.
- Friedel, J.; Langer, T.; Siebe, C. y Stahr, K. (2000) **Effects of long term wastewater irrigation on soil organic matter, soil microbial biomass and its activities in central Mexico**. *Soil Fertil Soils.*, 31, 414-421.
- Feigin, A.; Feingenbaum, S. y Limoni, H. (1981) **Utilization efficiency of nitrogen from sewage effluent and fertilizer applied to corn plants growing on a clay soil**. *J. Environ Qual.* 10:3, 284-287.
- Feigin, A.; Vaisman, I. y Bielora, H. (1984) **Drip irrigation of cotton with treated municipal effluent: II. Nutrient availability in soil**. *J. Environ Qual.* 13:2, 234-238.
- Fewtrell, L. (2004) **Drinking-Water Nitrate, Methemoglobinemia, and Global Burden of Disease: A Discussion**. *Environ Health Perspect.* 112: 14, 1371-1374.

García, F. (1999) Fertilización de pasturas y Verdeos. **Informaciones Agronómicas, Instituto de la potasa y el fósforo.** En línea: www.inta.gov.ar/expo/intaexpone/intaexpone04/charlas/saubidet/fertilizacion.pdf. Fecha de consulta: octubre de 2007.

González, B. (2007) **Cuantificación de la desnitrificación en suelos agrícolas del Valle del Mezquital.** Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

Gutiérrez, H. y De la Vara, R. (2004) **Análisis y diseño de experimentos.** Editorial Mc Graw Hill. México, D.F.

Herre, A. y Siebe, C. (2003). **Effect of irrigation water quality on organic matter, Cd and Cu movility in soils of Central Mexico.** *Wat. Sci. Tech.* Vol 50 No 2 pp 277-284.

Hulugalle, N.; Weaver, T.; Ghadiri, H. y Hicks, A. (2005) **Changes in soil properties of an eastern Australian vertisol irrigated with treated sewage effluent following gypsum application.** *Land Degradation & Development* Volumen 17, Issue 5, pp. 527 - 540

IMTA y CNA, (2000). **“Información de 322 estaciones climatológicas de referencia, DAT 322 Versión 1.0”.**

INFOAGRO, (2005) **El cultivo de la alfalfa.** En línea: <http://www.infoagro.com/herbaceos/forrajes/alfalfa.asp>. Fecha de consulta: octubre de 2005.

Jiménez, B., Siebe, C. y Cifuentes, E. (2004) **El agua en México vista desde la Academia.** Academia Mexicana de Ciencias. 1ra. Edición. México, D. F. pp 33-53.

Jhonson, A. Vietor, D. Rouquette, F. and Haby, V. (2004) **Fate of Phosphorus in dairy wastewater and poultry litter applied on grassland.** *Jour. Environ. Qual.* 33, 735-739

Jueschke, E.; Marschner, B; Tarchitzky, J. y Chen, Y. (in press). **Effects of TWW irrigation on the dissolved and soil organic carbon in Israeli soils.**

Lauchli, A. y Epstein, E. (1990) **Plant responses to saline and sodic conditions.** In **K.K. Tanji (ed.)**, *Agricultural Salinity Assessment and Management.* American Society of Civil Engineers, New York, pp. 113-137.

Leenher, J.; Aiken, G.; Woodside, G. y O'Connor-Patel, K. (2007) **DOM in recharge water of the Santa Anna River Basin.** *American Water Works Association, Journal* Jun 2007;99,6; ABI/INFORM Trade & Industry.

López, J.; Moreno, L.; Murillo, J.; Rubio, J. y Gómez, J. (2006) **Nuevas estrategias para la depuración y reutilización de las aguas residuales urbanas.** Empleo del terreno como almacén y depurador natural. En línea: <http://aguas.igme.es/igme/publica/>. Fecha de consulta: diciembre de 2006.

Kalavrouziotis, I.; Kanatas, P.; Papadopoulos, A.; Bladenopoulou, S.; Koukoulakis, P.; y Leotsiides, M. (2005) **Effects of municipal reclaimed wastewater on the macro y microelement status of soil and plants.** *Fresenius environmental bulletin*, volumen 14.

Kanarek, A.; Aarón, C. y Michail, M. (1993) **Municipal wastewater reuse via soil aquifer treatment for non potable purposes.** *Wat. Sci. Tech.*, 7-8, 53-61.

- Kanarek, A. y Michail, M. (1996) **Groundwater recharge with municipal effluent: Dan region reclamation Project, Israel.** *Wat. Sci. and Tech.* 32 : 11, 227-233.
- Kretschmer, N.; Ribbe, L. y Gaese, C. (2004) **Wastewater Reuse for Agriculture. Technology Ressource Management & Development** - Scientific Contributions for Sustainable Development. En línea: www.tt.fh-koeln.de/publications/ittpub301202_4.pdf. fecha de consulta: noviembre de 2005.
- Metcalf y Eddy (1995) **Ingeniería de Aguas Residuales. vol. 2: Tratamiento, Vertido y Reutilización**, Editorial McGraw-Hill, Estados Unidos. pp.1051-1071
- Metcalf y Eddy (2003) **Wastewater and engineering, treatment and reuse.** Editorial McGraw-Hill. Estados Unidos. pp.1051-1071
- Metson, J. (1973). **Sulphur in forage crops.** The sulphur Inst. Bull. 20
- Morón, A. (2000) **Alfalfa: Fertilidad de suelos y estado nutricional en sistemas agropecuarios de Uruguay. Informaciones agronómicas del Cono Sur. Instituto de la potasa y el fósforo.** En línea: www.produccionbovina.com/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas_fertilizacion/28-encalado.htm. Fecha de consulta: octubre de 2007
- Muñoz, D. (1999) **Estudio cartográfico y morfológico de los suelos de la porción sur del Valle del Mezquital.** Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Nema, P.; Ojha, P.; Kumar, A. y Khanna, P. (2001) **Techno-economic evaluation of soil-aquifer treatment using primary effluent at Ahmedabad, India.** *Wat. Res.* 35, 2179-2190
- Niborsky, M. (2000) **El exceso de sales y sodio en los suelos de las regiones áridas y semiáridas.** Cátedra de manejo y conservación de suelos. Universidad de Buenos Aires. Facultad de agronomía. En línea: www.agro.uba.ar/carreras/agronomia/materias/conser_l/sales.pdf . fecha de consulta: julio de 2006.
- NOM-127-SSA-1994 **Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano.** Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización. Secretaría de salud. Publicada en el Diario Oficial de la Federación. el día 20 de junio de 2000. México, D.F.
- NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Publicado en el diario oficial de la federación el día martes 31 de diciembre de 2002. México, D.F.
- Pacheco, J.; Canul, R. y Sansores, A. (2002) **Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos.** *Ingeniería* 6-3, 73-81.
- Palacios, E. (1981) **Introducción a la teoría de la operación de distritos y sistemas de riego.** Centro de Hidrociencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Ramos, C. (1997) **El uso de aguas residuales en riegos localizados y en cultivos hidropónicos.** Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias. Apdo. Oficial, 46113 Moncada. En línea: www.ediho.es/horticom/fitech3/ponencia/text/cramos.html Fecha de consulta: noviembre de 2005.

Ramírez-Fuentes, E.; Lucho-Constantino, C.; Escamilla-Silva, E. y Dendooven, L. (2002) **Characteristics, and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigate with wastewater for different lengths of time.** *Bioresource Technology* 85, 179-187.

Richards, E. (1954) **Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos.** Editorial Limusa. México, D.F.

Robles, C. (1996) **Irrigación con aguas residuales domésticas. Efectos sobre suelo y planta.** II Congreso de la Sociedad española de agricultura ecológica. Pamplona-Iruña. En línea: www2.sag.gob.cl/Recursos-Naturales/guia_riles_vinos/Anexo_J.pdf. Fecha de consulta: noviembre de 2005

Romero, H. (1997) **El Valle de Mezquital, México, estudio de caso.** En línea: <http://www.bvsde.ops.oms.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/repindex/repi066/vallemez.ht> ml. fecha de consulta: septiembre de 2005.

Salvagiotti, F. (2004) **Dinámica del nitrógeno en sistemas agrícolas y diagnóstico de fertilización.** En línea: <http://www.inta.gov.ar/expo/intaexpone/charlas/garcia/nitrogeno.pdf> Fecha de consulta: diciembre de 2005.

Saarijarvi, K.; Virkajarvi, P.; Heinonen-Tanski, H. y T Taipalinen, I., (2004) **N and P leaching and microbial contamination from intensively managed pasture and cut sward on Sandy soil in Finland,** *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104, 621-630.

Sawyer, C.; Perry, M. y Parkin, G. (2000) **Química para ingeniería ambiental.** Cuarta edición Edit. Mc Graw Hill

Seguí, L., (2004) **Sistemas de regeneración y reutilización de aguas residuales. Metodología para el análisis técnico-económico y casos.** Tesis de doctorado. Barcelona, España. pp. 13-25.

Shalscha, E.; Vergara, I.; Schirado, T. y Morales, M. (1979) **Nitrate movement in a Chilean agricultural Area irrigated with untreated sewage water.** *J. Environ. Qual.*, Vol. 8. No. 1. pp. 27-30.

Siebe, Ch. (1994) **Akkumulation, Mobilität und Verfügbarkeit vonSchwermetallen in langjährig mit Abwasser bewässerten BödenZentralmexikos.** Hohenheimer Bodenkundliche Hefte 17, Stuttgart, Institutfür Bodenkunde und Standortslehre (Ed.), Universität Hohenheim.

Siebe, C. (1998) **Nutrient inputs to soils and their uptake by alfalfa through long-term irrigation with untreated sewage effluent in Mexico.** *Soil Use and Management* 14, pp. 119-112.

Siebe and Cifuentes, (1995) **Enviromental impacts of wastewater irrigation in central Mexico: an overview.** *Internacional Journal of Enviromental Health Research.* Pp. 161-173.

Society of Civil Engineers (SCE). (1996) **Agricultural Salinity Assessment and Management.** New York, N. Y. pp. 1-29, 92-118, 584-593

Sotomayor G. C. (1998) **Estudio de la calidad y suministro del agua para consumo doméstico en el Distrito de Riego 03.** Tesis de maestría. IPN- ESIA

Stevenson J. F. y Cole M. A. (1999) **Cycles of soil: Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients.** Edit. John Wiley & Sons, Inc. Segunda Edición.

- Suarez, D. (1989) **Impact of agriculture practices on groundwater salinity.** *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 26 pp 215-227.
- Summer, D.; Rolston, D. y Bradner, L. (1998) **Nutrient transport and transformation beneath an infiltration basin.** *Water Res.*, 70,5; pp 997-1000
- Thompson, L. M. (1988) **Los Suelos y su Fertilidad.** Editorial Reverte. pp. 1-17
- Velásquez-Machuca, M.; Ortega-Escobar, M.; Martínez-Garza, A.; Kokashi-Shibata, J. y García-Calderón, N. (2002) **Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del Valle de Mezquital, Hidalgo, México.** *Terra* 20. pp. 459-464
- Vivanco-Estrada, R.A.; Gavi-Reyes, F.; Peña-Cabriales, J. y Martínez-Hernández J. (2001) **Flujos de Nitrógeno en un suelo cultivado con forrajes y regado con agua residual urbana.** *Terra* 19. pp. 301-308
- Vivas, H. (2004) **La fertilización como herramienta para incrementar la productividad de la alfalfa.** Presentado en INTA. Oliveros, Santa Fe. En línea: www.inta.gov.ar/rafaela/info/documentos/anuario2004/anuario2004_p75.pdf. Fecha de consulta: noviembre de 2007.
- Zérega, K.; Hernández, T. y Valladares, J. **Evaluación de 14 variedades de caña de azúcar en dos suelos afectados por sales bajo condiciones de umbráculo.** *Caña de azúcar*, Vol. 9(02): 81-98. 1991
- Zvomuya, F., Rosen, C., Gupta, S. (2007) **Phosphorus sequestration by chemical amendments to reduce leaching from waste.** *J. Environ. Qual.*, 35, 1 pg.2