

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)



**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS RESIDUALES
PROVENIENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO AURORA II CON
FINES DE RIEGO EN EL CULTIVO DE FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L.),
GUATEMALA.**

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)

POR

ING. AGR. ARIEL ELISEO TURCIOS PANTALEÓN

COMO REQUISITO PREVIO A OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO (MAGISTER SCIENTIFICAE) EN RECURSOS HIDRÁULICOS,
OPCIÓN GESTIÓN INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS
GUATEMALA, JUNIO DE 2011

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR



Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS RESIDUALES
PROVENIENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO AURORA II CON
FINES DE RIEGO EN EL CULTIVO DE FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L.),
GUATEMALA.**

Tema que fue autorizado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), en noviembre de 2010

Ing. Agr. Ariel Eliseo Turcios Pantaleón

Guatemala, junio de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

Decano	Ing. Murphy Olympo Paíz Recinos
Vocal I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
Vocal II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Vocal III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
Vocal IV	Br. Luis Pedro Ortiz de León
Vocal V	P.A. José Alfredo Ortiz Herincx
Secretario	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

DIRECTOR ERIS

Ing. MSc. Pedro Saravia Celis

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL

EXAMINADOR	Ing. MSc. Pedro Saravia Celis
EXAMINADOR	Ing. MSc. Zenón Much Santos
EXAMINADOR	Ing. MSc. Joram Gil

ASESOR DE ESTUDIO ESPECIAL

Ing. MSc. Joram Gil

ESTUDIO DE TESIS QUE DEDICO

A:

DIOS: Nuestro padre celestial por darme la vida, por permitirme alcanzar una meta más, por darme sabiduría, fortaleza y ser siempre la luz que ilumina mi camino.

MIS PADRES: Eliseo Turcios Balcárcel
Lucila Pantaleón de Turcios,
con mucho amor por estar siempre a mi lado en los momentos difíciles, contando con su apoyo incondicional, enseñándome el camino correcto con sus sabios consejos.

MIS HERMANAS: Bery Nohemí, Rosibel y Elisabeth Turcios
porque en los momentos difíciles me brindaron su apoyo.

MIS SOBRINOS: Carlos, Ayleen, Hirold, Blanca, Wendy, Magali, Delmy, Ashley y Jonatán.

MI ESPOSA: Lilian Méndez, por todo su apoyo, comprensión y amor.

AGRADECIMIENTOS

A:

Todo el personal de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), por todo su apoyo brindado durante mis estudios.

Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”, de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, por sus servicios prestados para llevar a cabo el análisis de las muestras de agua.

Laboratorio de Suelo y Agua de la Facultad de Agronomía, USAC, por las facilidades brindadas para llevar a cabo el análisis químico de las muestras de agua.

Mi asesor, Ing. MSc. Joram Gil, por su esfuerzo y apoyo al realizar el trabajo de tesis.

Mis evaluadores, Ing. MSc. Pedro Saravia, Ing. MSc. Joram Gil, Ing. MSc. Zenón Much, por guiar de una manera correcta la investigación realizada.

Todos mis compañeros de Maestría, especialmente a Ernesto Moscoso, Walter Bardales y Vicente Calderón por haber compartido momentos inolvidables durante nuestros estudios.

Mis amigos, especialmente al Ing. Waldemar Nufio, por brindarme todo su apoyo incondicional.

Mi suegra, Mary Luz Nufio por estar siempre a mi lado en los momentos difíciles
A todos ellos, muchas gracias y que Dios los bendiga siempre.

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Pág.
RESUMEN	vii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
3. OBJETIVOS.....	5
3.1 General.....	5
3.2 Específicos.....	5
4. HIPÓTESIS.....	6
5. JUSTIFICACION	¡Error! Marcador no definido.
6. ALCANCES Y LIMITANTES DE LA INVESTIGACIÓN	9
7. MARCO TEORICO	10
7.1 El uso de aguas residuales tratadas en Agricultura	10
7.2 Composición de las aguas residuales.....	12
7.3 Análisis bacteriológico de aguas	14
7.4 Efecto del uso de aguas residuales	14
7.5 Precauciones recomendadas en la operación de sistemas de riego con aguas residuales	16
7.6 Beneficios del uso seguro de las aguas residuales en la agricultura.....	17
7.7 Los beneficios compensan los costos	18
7.8 Métodos de Tratamiento	19
7.9 Calidad de agua para riego de cultivos	20
7.10 Riesgo de salinidad.....	24
7.11 Peligro del sodio en aguas de regadío	27

7.12 Relación de absorción de sodio (RAS).....	28
7.13 Elementos químicos fitotóxicos en aguas de riego.....	29
8. MARCO REFERENCIAL	31
8.1 ANTECEDENTES	31
8.2 Datos promedio obtenidos del proceso de tratamiento de la planta Aurora II	32
8.3 REGLAMENTO DE LAS DESCARGAS Y REUSO DE AGUAS RESIDUALES Y DE LA DISPOSICIÓN DE LODOS (236-2006)	34
8.3.1 Parámetros y límites máximos permisibles para el reuso de aguas residuales.....	34
8.4 Ubicación de la investigación.....	37
8.5 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL EXPERIMENTAL	38
8.5.1 Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> , L.).....	38
8.5.2 Clima y suelos.....	39
8.5.3 Sedimentador Primario	39
8.5.4 Batería de Filtros colocados en Serie de mediana altura	40
8.5.5 Filtro percolador con ripio	41
9. METODOLOGÍA	42
9.1 FASE DE GABINETE INICIAL	42
9.2 FASE DE CAMPO	42
9.2.1 Factor que se evaluó	42
9.2.2 Diseño experimental	43
9.2.3 Tratamientos.....	43
9.2.4 Unidad experimental	44
9.2.5 Unidad de muestreo	44
9.2.6 Modelo estadístico.....	44

9.2.7 Variables de respuesta.....	45
9.2.8 Manejo del experimento	45
9.3 FASE DE LABORATORIO.....	45
9.4 FASE DE GABINETE FINAL.....	46
9.4.1 Análisis de los datos	46
10. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	47
11. CONCLUSIONES.....	69
12. RECOMENDACIONES.....	72
13. BIBLIOGRAFIA.....	¡Error! Marcador no definido.
ANEXOS	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo de agua en la planta de tratamiento de agua residual Aurora II	38
Figura 2. Comparación de medias de la variable longitud aérea.....	49
Figura 3. Altura de plantas.....	50
Figura 4. Repeticiones de los tratamientos de la variable de respuesta Altura de Plantas (H).....	50
Figura 5. Comparación de medias de la variable biomasa fresca aérea.....	52
Figura 6. Repeticiones de los tratamientos de la variable de respuesta Biomasa Fresca Aérea (BFA)	53
Figura 7. Comparación de medias de la variable biomasa fresca radicular.....	55
Figura 8. Repeticiones de los tratamientos de la variable de respuesta Biomasa Fresca Radicular (BFR).....	56
Figura 9. Comparación de medias de la variable biomasa seca aérea	58
Figura 10. Repeticiones de los tratamientos de la variable de respuesta Biomasa Seca Aérea (BSA)	59
Figura 11. Comparación de medias de la variable biomasa seca radicular	61
Figura 12. Repeticiones de los tratamientos de la variable de respuesta Biomasa Seca Radicular (BSR).....	61
Figura 13. Comparación de medias de la variable número de frutos.....	63
Figura 14. Repeticiones de los tratamientos de la variable de respuesta Número de Frutos (NF)	64

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Pág
Cuadro 1. Valores indicativos de calidad de agua para riego	20
Cuadro 2. Parámetros para el reuso del agua con interés desde el punto de vista agrícola.....	22
Cuadro 3. Rangos de salinidad en el agua	25
Cuadro 4. Tolerancia relativa de varios cultivos a la salinidad	26
Cuadro 5. Cultivos tolerantes a la salinidad y potencial de rendimiento	27
Cuadro 6. Peligro de RAS en aguas de regadío	28
Cuadro 7. Niveles tóxicos de iones específicos (meq/l).....	29
Cuadro 8. Parámetros fisicoquímicos y biológicos de la planta de tratamiento Aurora II	31
Cuadro 9. Análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos Aurora II	33
Cuadro 10. Parámetros y límites máximos permisibles para el reuso.....	34
Cuadro 11. Límites máximos permisibles	35
Cuadro 12. Restricción de cultivos en función del tipo de agua y método de riego ...	36
Cuadro 13. Dimensiones del sedimentador primario.....	40
Cuadro 14. Descripción de los tratamientos y repeticiones	43
Cuadro 15. ANDEVA para Altura de plantas (H).....	47
Cuadro 16. ANDEVA para Biomasa Fresca Aerea (BFA).....	51
Cuadro 17. ANDEVA para la variable Biomasa Fresca Radicular (BFR)	54
Cuadro 18. ANDEVA para la variable Biomasa Seca Aerea (BSA)	57
Cuadro 19. ANDEVA para la variable Biomasa Seca Radicular (BSR).....	60

Cuadro 20. ANDEVA para la variable Número de Frutos (NF)	62
Cuadro 21. Comparación de los dos filtros percoladores	64
Cuadro 22. Análisis químico del agua	66
Cuadro 23. Análisis físico y microbiológico del agua	67
Cuadro 24. Distribución de las unidades experimentales en el campo	76
Cuadro 25. Datos obtenidos en campo de las variables de respuesta	77

RESUMEN

La fase de campo de la investigación se llevó a cabo en la planta de tratamiento Aurora II, zona 13, Guatemala, durante el tiempo comprendido entre febrero a mayo del año 2011.

Se investigaron cuatro puntos de muestreo en la planta de tratamiento y un control o testigo en donde se utilizó agua potable, haciendo un total de cinco clases de agua utilizada para el riego del cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*, L.), variedad ICTA ligero. Desde el punto de vista estadístico, a estas clases de agua se les llamarán tratamientos. Los cuatro puntos de muestreo fueron en la entrada del sedimentador, salida del sedimentador, salida del primer filtro (contiene piedrín) y salida del filtro experimental (contiene block triturado proveniente de la demolición de construcciones).

El diseño experimental utilizado fue el de bloques al azar, con un total de 25 unidades experimentales (5 tratamientos por 5 bloques), con un número de dos plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris*, L.) por unidad experimental.

Las variables de respuesta fueron las siguientes: altura de las plantas de frijol, biomasa fresca aérea, biomasa fresca radicular, biomasa seca aérea, biomasa seca radicular y número de frutos. Los datos se obtuvieron tres meses después de la siembra. A las variables de respuesta se les aplicó un análisis de varianza auxiliándose del programa de computación InfoStat, determinándose así la existencia o no existencia de diferencia significativa entre los puntos de muestreo. Posteriormente se realizó una prueba múltiple de medias TUKEY al 5% de significancia.

Los puntos de muestreo en donde se obtuvo mejor respuesta en el cultivo de frijol fueron en la salida del sedimentador primario, salida del primer filtro y salida filtro experimental. Respecto a la altura de plantas de frijol, el agua residual tomada en la salida del primer filtro se obtuvo la media superior con una altura de 17.34 centímetros, aunque muy cerca de este valor está el agua tomada en la salida del sedimentador primario, con una media de 17.16 centímetros. En cuanto a la biomasa fresca aérea y

biomasa seca aérea, los valores más altos lo reportaron las plantas regadas con el agua de la salida del sedimentador primario con una biomasa fresca aérea de 72.92 gramos y biomasa seca aérea de 19.51 gramos. Para las variables biomasa fresca radicular y biomasa seca radicular los mejores tratamientos son en donde se utilizó el agua para riego en la salida del filtro experimental y en la salida del sedimentador primario. El mayor número de frutos se obtuvo en donde se utilizó el agua proveniente del primer filtro con una media de 16 ejotes, y salida del sedimentador primario con una media de 15 frutos.

Al analizar los datos con el programa InfoStat se determinó que en casi todas las variables de respuesta existe diferencia significativa a un 95% de confianza, únicamente en la variable número de frutos no existe diferencia significativa. En todas las variables de respuesta, el tratamiento con la media inferior es en donde se regaron las plantas con agua potable. Al agua utilizada para riego del cultivo, proveniente de cuatro puntos distintos en la planta de tratamiento y agua potable (como testigo o control) se le realizó un análisis físico, químico y microbiológico para poder interpretar los resultados de una manera más precisa.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando las aguas residuales son descargadas a los ríos o cuerpos de agua sin ningún tratamiento o desinfección suelen contaminarlos con altas concentraciones de materia orgánica, sólidos y microorganismos patógenos, creándose un grave problema de salud pública.

El agua de mejor calidad debe destinarse siempre al consumo humano, siguiendo en importancia la destinada al riego de cultivos para consumo humano. Si las aguas de riego están muy contaminadas, la salud dependerá del buen manejo agrícola, del buen mercadeo, y del buen manipuleo de los alimentos, lo cual es muy difícil que se haga bien en países con higiene precaria. Lo anterior hace necesario seguir una política continua de mejoramiento de la calidad del agua para riego.

Los seres humanos no necesitamos ambientes o alimentos estériles sino limpios. Las mejores medidas de saneamiento es reducir la concentración de patógenos en el medio ambiente, es decir en el agua, en el suelo, en los cultivos, en los alimentos.

Existen algunas posibilidades de resolver el problema con las llamadas tecnologías apropiadas, con un tratamiento adecuado y económico del agua residual para su reutilización en cultivos agrícolas.

El interés al haber realizado esta investigación es aprovechar el agua residual tratada, proveniente de distintos sistemas de tratamiento como el tanque de sedimentación y filtros percoladores, para el riego del cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L).

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas (ARD) requieren de costos de inversión altos para su ejecución, operación y mantenimiento. Este último aspecto es clave para el sostenimiento en el tiempo de estos sistemas. La reutilización de ARD por medio del riego puede ser una alternativa de bajo costo para disponer adecuadamente de las aguas, evitando que lleguen a los cuerpos de agua y causen problema de contaminación además, se le está dando un uso adecuado a dicho recurso, el cual es cada vez más escaso.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua es uno de los recursos naturales fundamentales y, al igual que el bosque, el aire, el suelo y la energía, constituye uno de los recursos básicos en que se apoya el desarrollo. Hoy en día, la importancia tanto de la cantidad como de la calidad del agua está fuera de toda duda.

El agua es uno de los compuestos más abundantes de la naturaleza y cubre aproximadamente tres cuartas partes de la superficie de la tierra. Sin embargo, diversos factores limitan la disponibilidad de agua para uso humano. Más del 97% del agua total del planeta se encuentra en los océanos y otras masas salinas, y su uso está restringido para determinado propósito. Del 3% restante, por encima del 2% se encuentra en estado sólido, resultando prácticamente inaccesible. Por tanto, podemos terminar diciendo que para el hombre y sus actividades industriales y agrícolas, sólo resta un 0,62 % que se encuentra en lagos, lagunas, ríos y agua subterránea. La cantidad de agua disponible es escasa, aunque mayor problema es aún su distribución irregular en el planeta.

El uso no moderado de los recursos naturales provoca un efecto negativo sobre los ecosistemas de donde se extraen y en los ecosistemas en donde se utilizan. El caso del agua es uno de los ejemplos más claros, un mayor suministro de agua significa una mayor carga de aguas residuales.

Hay que considerar también que el hombre influye sobre el ciclo del agua de dos formas distintas, en forma directa mediante extracción de las mismas y posteriormente vertiendo las aguas contaminadas como se ha dicho, o bien indirectamente alterando la vegetación y la calidad de las aguas.

Las aguas residuales han ido variando la concentración de elementos no deseables como resultado de su uso en diversas actividades. También se denominan vertidos. Se trata de aguas con un alto contenido en elementos contaminantes, que a su vez van a contaminar aquellos sistemas en los que son evacuadas. Éstas constituyen un importante foco de contaminación de los sistemas acuáticos, siendo necesarios los sistemas de depuración antes de evacuarlas, como medida importante para la conservación de los sistemas. Del total de vertido generado por los focos de contaminación, sólo una parte es recogida en redes de saneamiento, mientras que el resto es evacuado a sistemas naturales directamente sin ningún tratamiento previo.

En Guatemala y en la mayoría de países en subdesarrollo, la agricultura es la actividad que más demanda agua y a la vez las aguas servidas para esta actividad y las aguas residuales provenientes de los hogares contaminan otras fuentes de agua, habiendo cada día menor disponibilidad de agua apta para el consumo humano. La pregunta como solución a esta problemática sería, ¿se puede usar el agua residual para riego de cultivos agrícolas, desde el punto de vista físico, químico y microbiológico?

3. OBJETIVOS

3.1 General

Evaluar las aguas residuales provenientes de la planta de tratamiento Aurora II con fines de riego en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.).

3.2 Específicos

1. Determinar el método de tratamiento de aguas residuales más efectivo con fines de riego en la producción de biomasa aérea y radicular del cultivo de frijol.
2. Determinar el punto de muestreo de agua residual con la menor cantidad de microorganismos patógenos y elementos fitotóxicos como el Boro.
3. Aprovechar eficientemente el agua residual proveniente de la colonia Aurora II después de haber pasado por un tratamiento primario para regar el cultivo de frijol.
4. Generar conocimiento para darle un uso adecuado a las aguas residuales para poderse reutilizar con fines de riego en cultivos agrícolas de forma segura.

4. HIPÓTESIS

El agua proveniente de al menos uno de los cuatro puntos de muestreo de la planta de tratamiento Aurora II cumple con los parámetros físicos, químicos y biológicos para poderse reutilizar en el riego del cultivo de frijol (***Phaseolus vulgaris***, L.), produciendo rendimientos aceptables en altura de las plantas, biomasa radicular, biomasa aérea y producción.

5. JUSTIFICACIÓN

La escasez cada vez mayor de agua dulce debido al crecimiento demográfico, a la urbanización y, probablemente, a los cambios climáticos, ha dado lugar al uso creciente de aguas residuales para la agricultura, la acuicultura, la recarga de aguas subterráneas y otras áreas.

En los países donde se han realizado programas de lucha contra la contaminación de las aguas, estos programas han conducido siempre a una reducción del consumo de agua, incluso en los países húmedos. Estas experiencias serían aun de mucho más interés en los países situados en áreas con escasez de agua.

Las buenas prácticas en la gestión del recurso agua serán las que tengan por finalidad disminuir el gasto de agua, disminuyendo su consumo o reciclando y reutilizando al máximo el suministro; extraerla con el menor deterioro posible de los ecosistemas, es decir, dejando una parte para el cauce de ríos, humedales y acuíferos subterráneos; devolverla a las aguas naturales en condiciones aceptables para que el impacto sobre los ecosistemas sea mínimo. Al llevar a cabo todas estas técnicas se está eficientando el uso del agua y a la vez se disminuye la contaminación.

En algunos casos, las aguas residuales son el único recurso hídrico de las comunidades pobres que subsisten por medio de la agricultura. Si bien el uso de aguas residuales en la agricultura puede aportar beneficios (incluidos los beneficios de salud como una mejor nutrición y provisión de alimentos para muchas viviendas), su uso no controlado generalmente está relacionado con

impactos significativos sobre la salud humana. Estos impactos en la salud se pueden minimizar cuando se implementan buenas prácticas de manejo.

En Guatemala a la mayoría de las aguas residuales no se les da un tratamiento previo a descargarse en otras fuentes de aguas limpias. El recurso agua disminuye constantemente siendo necesario utilizar métodos económicos para tratar el agua y poderse reutilizar en el riego de cultivos agrícolas en donde la calidad del agua es importante pero no tan exigente en cuanto al contenido microbiológico y químico para el consumo humano, siendo la agricultura la actividad en donde se consume aproximadamente el 70% del agua .

Es por esto que se llevó a cabo una investigación donde se involucraron procesos de bajo costo para el tratamiento del agua con el fin de poderse reutilizar en el riego de cultivos agrícolas como es el caso del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), siendo un cultivo de importancia económica y nutricional, con un contenido de 19.2% de proteína, 61.5% de carbohidratos, 4.3% de fibra, entre otros compuestos esenciales. Reciclar las aguas residuales urbanas y usarlas para los cultivos agrícolas puede ayudar a mitigar los problemas de contaminación y escasez del agua y alimentos.

6. ALCANCES Y LIMITANTES DE LA INVESTIGACIÓN

El alcance de la presente investigación, comprende un análisis físico, químico y microbiológico al agua residual en cuatro puntos de muestreo en la planta de tratamiento Aurora II y al agua potable tomada como control. En el análisis físico-químico se determinó sólidos totales en suspensión, pH, conductividad eléctrica, N, P, Ca, Mg, Na, K, Cu, Zn, Fe, Mn, B, RAS, clase de agua. En el análisis microbiológico se determinó en número más probable en cien mililitros (NMP/100 ml) de coliformes totales y fecales. El efecto de estas aguas se observó en el crecimiento y desarrollo del cultivo de frijol con la toma de datos de altura de plantas, biomasa aérea, biomasa radicular y número de frutos.

Con la presente investigación no se pretendía determinar la lámina de riego y frecuencia de riego del cultivo, DBO₅ y DQO debido a que no aplica para cultivos agrícolas. No se investigaron dosis de fertilizados debido a que no se hizo uso de ellos. La investigación se realizó en época seca (febrero-mayo).

7. MARCO TEÓRICO

El uso de aguas residuales para el riego de cultivos es cada vez más común. El rendimiento de los cultivos es superior, ya que las aguas residuales contienen nutrientes para el desarrollo de las plantas. Sin embargo, existe el riesgo de que el riego con aguas residuales facilite la transmisión de enfermedades relacionadas con nematodos intestinales y bacterias fecales a consumidores y agricultores.

7.1 El uso de aguas residuales tratadas en agricultura

El uso de aguas residuales en agricultura constituye una de las herramientas más valiosas que tienen los países en vías de desarrollo para controlar la contaminación y hacer frente al reto que constituye incrementar la producción agrícola con un recurso hídrico escaso.

Sin embargo, la FAO agregó que el riego de cultivos agrícolas con aguas residuales se usa en un centenar de países y ocupa una superficie equivalente al 10% de las tierras cultivadas a nivel mundial. En España y México -por ejemplo-, un porcentaje elevado de esas aguas se destina al riego.

El organismo de la ONU explicó que una gestión segura de las aguas residuales en la producción alimentaria supone una forma de aliviar la competencia entre las ciudades y la agricultura por el agua en regiones donde la escasez va en aumento.

Las aguas residuales constituyen un problema sanitario, pero a su vez un recurso muy apreciado para el riego y la piscicultura; de gran valor económico en áreas desérticas o con estiajes prolongados.

Los nutrientes presentes en las aguas residuales tienen valor como fertilizantes y aumentan el rendimiento de los cultivos, estos nutrientes se conservan en el protoplasma de las algas al tratar las aguas residuales en lagunas de estabilización.

Los tóxicos y microorganismos patógenos presentes en las aguas residuales pueden causar efectos nocivos a la salud y/o a los cultivos, si no se utilizan el tratamiento y el manejo adecuados.

Algunas sustancias presentes en las aguas residuales pueden resultar perjudiciales a los suelos, a corto, mediano o largo plazo si no se toman las medidas correctivas apropiadas.

La aplicación de aguas residuales, crudas o previamente tratadas al suelo, campos de cultivo, o estanques de piscicultura constituye en sí un tratamiento adicional que mejora la calidad de las mismas (Sáenz, 2002).

Principales cultivos en donde se usa el agua residual con fines de riego:

- Silvicultura
- Forrajes, hierbas, alfalfa, frijol, etc.
- Maíz, trigo, cebada, caña de azúcar, remolacha
- Menta, algodón, tabaco.

Sólo con buen manejo y alto grado de tratamiento:

- Frutas
- Vegetales

7.2 Composición de las aguas residuales

Las aguas residuales, por lo regular, tienen composiciones altamente complejas y normalmente se necesita modificar su composición para ajustarlas a un uso en particular. En consecuencia, se requiere una variedad de procesos de tratamiento para separar los diversos contaminantes que con seguridad se encontrarán.

Los contaminantes pueden estar presentes como:

1. Sólidos suspendidos flotantes o grandes: arenas, trapos y papel entre otros.
2. Sólidos suspendidos pequeños y coloidales: moléculas orgánicas grandes, partículas de suelo y microorganismos entre otros.
3. Sólidos disueltos: compuestos orgánicos y sales inorgánicas entre otros.
4. Gases disueltos: Sulfuro de Hidrógeno, entre otros.
5. Líquidos no mezclables: grasas y aceites.

Para determinar la composición de las aguas residuales se realizan diversas medidas físicas, químicas y biológicas, entre las que se incluyen la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), la demanda química de oxígeno (DQO), el pH, el nitrógeno total, los detergentes, los sólidos suspendidos totales, los organismos coliformes totales y los organismos coliformes fecales.

La DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), es la cantidad de oxígeno requerida para la degradación bioquímica del material orgánico presente, así como también la cantidad de oxígeno necesario para oxidar el material inorgánico (sulfuros, iones ferrosos etc.).

La DQO es la demanda química de oxígeno y se obtiene al someter la muestra a un calentamiento con reflujo en presencia de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y una cantidad conocida de dicromato de potasio. El exceso de dicromato se valora con sal ferrosa. La cantidad de materia oxidable es proporcional al dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) consumido (Saenz, 2002).

En las aguas residuales, se encuentra gran cantidad de materia orgánica y muchas de ellas contienen nitrógeno, por lo que el agua residual puede presentar nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico, la suma de ambos es el nitrógeno total.

Los microorganismos que están presentes en las aguas residuales son muy diversos, sin embargo, la determinación del número más probable de microorganismos (NMP) Coliformes Fecales y Coliformes Totales en 100 ml de muestra dando un indicio del grado de contaminación del agua residual. El Método de Número Más Probable (NMP) es una estrategia eficiente de estimación de densidades poblacionales, especialmente cuando una evaluación cuantitativa de células individuales no es factible.

Los residuos sólidos comprenden los sólidos disueltos y en suspensión. Los sólidos disueltos son productos capaces de atravesar un papel de filtro, y los suspendidos los que no pueden hacerlo. Todos estos sólidos pueden dividirse en volátiles y fijos, siendo los volátiles, por lo general, productos orgánicos y los fijos materia inorgánica o mineral (Tebbutt, 1990).

7.3 Análisis bacteriológico de aguas

Existe un grupo de enfermedades conocidas como enfermedades hídricas, pues su vía de transmisión se debe a la ingestión de agua contaminada. Es entonces conveniente determinar la potabilidad desde el punto de vista bacteriológico. Buscar gérmenes como *Salmonella*, *Shigella*, trae inconvenientes, pues normalmente aparecen en escasa cantidad. Por otra parte su supervivencia en este medio desfavorable y la carencia de métodos sencillos y rápidos, llevan a que su investigación no sea satisfactoria, especialmente cuando se hallan en número reducido.

En vista de estos inconvenientes se ha buscado un método más seguro para establecer la calidad higiénica de las aguas, método que se basa en la investigación de bacterias coliformes como indicadores de contaminación fecal. El agua que contenga bacterias de ese grupo se considera potencialmente peligrosa, pues en cualquier momento puede llegar a vehiculizar bacterias patógenas, provenientes de portadores sanos, individuos enfermos o animales (Tebbutt, 1990).

7.4 Efecto del uso de aguas residuales

La aplicación de aguas residuales a terrenos agrícolas puede originar riesgos a la salud humana debido a la presencia de metales, productos químicos, orgánicos y otros compuestos tóxicos. Estas sustancias pueden entrar a la cadena alimenticia a través de alimentos para el hombre, o a través de alimentos para animales.

Un elemento importante presente en las aguas residuales es el Cd, el cual es rápidamente absorbido por las plantas y no es fitotóxico. El Cd es muy tóxico al hombre y se acumula en el hígado y en los riñones. La OMS ha recomendado que no se ingiera por personas más de 400-500 mg de Cadmio por semana.

Muchos países han desarrollado normas para la aplicación de aguas residuales y lodos procedentes del tratamiento de las mismas a suelos agrícolas con base en el contenido de Cadmio, o en las cargas de Cadmio aplicadas a los suelos a los cuales se aplican.

Existe poca información sobre la absorción por los cultivos de compuestos químicos orgánicos sintéticos que estén presentes en las aguas de riego. Los pesticidas y los bifenilos policlorados (PCB) sintéticos están relativamente inmóviles en el suelo y no son absorbidos por las plantas. Sin embargo, pueden ser absorbidos por los animales que están en los pastizales y luego ser encontrados en la leche.

El reúso de aguas residuales sin tratar o con tratamiento inadecuado en la agricultura, implica riesgos de salud para los trabajadores agrícolas y sus familias, lo mismo que para la población en general que consume los productos así obtenidos si se presentan altas tasas de enteritis y otras enfermedades diarreicas, lo mismo que tifoidea y cólera entre parte de la población que genera las aguas residuales. Los gérmenes causantes de estas enfermedades son por consiguiente diseminadas al ambiente a través de las aguas servidas. El bajo grado de saneamiento ambiental, y el uso de aguas residuales crudas en riego sin control es causa de la alta incidencia de enfermedades entéricas causadas por bacterias (salmonellas, shigellas, *Vibrio cholerae*), parásitos y virus (Sáenz, 2002).

7.5 Precauciones recomendadas en la operación de sistemas de riego con aguas residuales

1. Análisis de la calidad del agua servida en relación con los cultivos previstos y el tipo o los tipos de suelo. Investigar existencia de normas.
2. Sustancias tóxicas y detergentes no biodegradables, etc. Tratar de controlarlos en su fuente de origen.
3. Se debe dar preferencia a los suelos con alto contenido de materia orgánica y alcalinos para minimizar la toma de metales pesados por las plantas.
4. Se debe dar preferencia a cultivos que no se coman crudos, que tengan alto valor nutritivo y sean de un consumo de agua moderado.
5. Se debe utilizar el grado de tratamiento que sea requerido según el uso restringido o irrestricto del agua y tomando en cuenta el método de riego que se utilice (subsuelo, atomización, etc.).
6. Para proteger la salud de los consumidores, debe practicarse la cosecha entre 2 y 4 semanas después del último riego con aguas residuales.
7. Tratar de eliminar las posibles molestias causadas por moscas, mosquitos, olores y otros.
8. Salud ocupacional: Proteger la salud de los campesinos. Si el clima y las circunstancias lo permiten, considerar el uso de guantes, botas y otros. Debe existir control médico (chequeo cada 3 meses) del personal y de sus familiares que vivan en el área de riego.
9. El sistema de riego deberá contar con dispositivos que permitan un buen manejo y dosificación del agua.

10. Deberá contarse con capacidad de almacenamiento del agua servida, efluentes tratados, o tierra agrícola adicional o dispositivos para orientar en forma sanitaria las aguas servidas durante los períodos en que no se necesite o sea necesario suprimir el riego.
11. Debe evitarse la erosión del suelo, la descarga de agua en exceso (excediendo la permeabilidad del terreno) y el deterioro del agua subterránea con patógenos, nitratos y otros.
12. Deberá contarse con dispositivos para medición del flujo y control del efluente. Usar canaletas parshall, vertederos y otros.
13. Especial atención se dará a la etapa de cosecha, procurando usar agua de muy buena calidad para el lavado de los productos antes de su envío al mercado.
14. Igual cuidado se tendrá en la conservación higiénica de los productos durante toda la etapa de almacenamiento, transporte y mercadeo.
15. Deberá hacerse un monitoreo sobre calidad toxicológica y microbiológica de los productos procedentes de estas áreas de riego. Como patrón de comparación deberá hacerse el mismo tipo de control con productos procedentes de áreas de riego donde no se utilicen aguas residuales o altamente contaminadas.

7.6 Beneficios del uso seguro de las aguas residuales en la agricultura

Reciclar las aguas residuales urbanas y usarlas para los cultivos agrícolas puede ayudar a mitigar los problemas de escasez de agua y reducir su contaminación, pero se trata de una práctica que no está tan extendida como debiera, según un último informe de la FAO.

Si bien a escala global tan sólo una pequeña parte de las aguas residuales tratadas se utilizan para la agricultura, esta práctica atrae cada vez mayor interés en todo el mundo, y en algunos países -España y México, por ejemplo- un porcentaje elevado de las aguas tratadas se destinan al riego.

Los campesinos también podrían ahorrarse parte del costo de bombear aguas subterráneas, al tiempo que los nutrientes presentes en las aguas residuales reducen el gasto en fertilizantes.

"Tratada de forma adecuada y reciclada en forma segura, el agua puede ofrecer potencialmente un 'triple dividendo' a los usuarios urbanos, los campesinos y el medio ambiente", concluyó Steduto, director de la FAO.

7.7 Los beneficios compensan los costos

Ya que la realización de sistemas adecuados para el tratamiento y reciclaje de las aguas residuales contempla inversiones iniciales de capital y costos operativos permanentes, el mayor beneficio debería resultar del elevado valor del agua potable que se libera para el consumo urbano o el uso industrial. Ello reduciría los costos que deben soportar las autoridades municipales para localizar recursos hídricos adicionales a través de medios más costosos.

Y los costos se podrían compensar aún más reutilizando el biogás generado durante el tratamiento de las aguas como fuente de energía, o incluso potencialmente mediante la venta de créditos de carbono.

Si bien el reciclaje de aguas residuales en la agricultura no es la única forma de hacer frente a los problemas de escasez y contaminación, en muchos casos se trata de una solución extremadamente rentable.

7.8 Métodos de tratamiento

Los principales métodos de tratamiento de las aguas residuales urbanas tienen tres fases: el tratamiento primario, que incluye la eliminación de arenillas, la filtración, el molido, la floculación (agregación de los sólidos) y la sedimentación; el tratamiento secundario, que implica la oxidación de la materia orgánica disuelta por procesos biológicos, que seguidamente es filtrado; y el tratamiento terciario, en el que se emplea la desinfección y métodos biológicos avanzados para la eliminación del nitrógeno y métodos físicos y químicos, tales como la filtración granular y la adsorción por carbono activado.

Hay tres clases principales de procesos de tratamiento

- **Procesos físicos** que dependen esencialmente de las propiedades físicas de la impureza, como tamaño de partícula, peso específico y viscosidad. Ejemplos comunes de este tipo de procesos son: cribado, sedimentación, filtrado, transferencia de gases.
- **Procesos químicos** que dependen de las propiedades químicas de una impureza o que utilizan las propiedades químicas de reactivos agregados. Algunos procesos químicos son: coagulación, precipitación, intercambio iónico.
- **Procesos biológicos** que utilizan reacciones bioquímicas para quitar impurezas solubles o coloidales, normalmente sustancias orgánicas. Los procesos biológicos aeróbicos incluyen filtrado biológico y los lodos activados. Los procesos de oxidación anaeróbica se usan para la estabilización de lodos orgánicos y desechos orgánicos de alta concentración (Soledad).

7.9 Calidad de agua para riego de cultivos

En el cuadro que se muestra a continuación se han propuesto diversos indicadores de calidad de un agua para riego. Los valores han sido desarrollados por el Committee of Consultants de la Universidad de California y posteriormente ampliados por Ayers y Westcot:

Cuadro 1. Valores indicativos de calidad de agua para riego

Problemas potenciales en el riego		Grado de restricción en el uso			Unidad
		Ninguno	Ligero a moderado	Estricto	
Salinidad, afecta a la disponibilidad de agua para los cultivos.	CE _w	< 0,7	0,7-3,0	> 3,0	dS/m
	SDT	< 450	450-2000	> 2000	mg/l
Permeabilidad, afecta a la velocidad de infiltración del agua en el suelo. Se evalúa utilizando EC _w y RAS juntos.	RAS 0-3	CE _w : ≥ 0,7	0,7-0,2	< 0,2	dS/m
	RAS 3-6	CE _w : ≥ 1,2	1,2-0,3	< 0,3	dS/m
	RAS 6-12	CE _w : ≥ 1,9	1,9-0,5	< 0,5	dS/m
	RAS 12-20	CE _w : ≥ 2,9	2,9-1,9	< 1,9	dS/m
	RAS 20-40	CE _w : ≥ 5,0	5,0-2,9	< 2,9	dS/m
Toxicidad de iones específicos,	Sodio (riego superficial)	< 3	3-9	> 9	RAS
	Sodio (riego)	< 70	> 70		mg/l

afecta a los cultivos sensibles.	con aspersores)				
	Cloro (riego superficial)	< 140	140-350	> 350	mg/l
	Cloro (riego con aspersores)	< 100	> 100		mg/l
	Boro	< 0,7	0,7-3	> 0,3	mg/l
Otros efectos, afectarían a cultivos sensibles.	Nitrógeno (N total)	< 5	5-30	> 30	mg/l
	Bicarbonato (aspersores elevados)	< 90	90-500	> 500	mg/l
	Cloro residual (aspersores elevados)	< 1,0	1,0-5,0	> 5,0	mg/l
Acidez , afectaría a cultivos sensibles.	pH	Intervalo óptimo variable			

Fuente: Ayers & Westcot,

- CE_w : conductividad eléctrica del agua de riego. Se utiliza como medida indirecta de la concentración en sólidos disueltos totales (SDT). Se expresa en deciSiemens por metro (dS/m).

- SDT: sólidos disueltos totales. Para la mayoría de las aplicaciones agrícolas existe una relación directa entre los valores de conductividad eléctrica (CE) y los de SDT con una precisión en torno al 10 %. La conversión se realiza mediante la siguiente expresión:

$$\text{SDT} \approx \text{CE} \cdot 640 \quad (\text{mg/l})$$

- RAS o SAR: relación de adsorción de sodio. Da una idea de la cantidad de sodio presente en el agua de riego en relación con otros cationes y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{RAS} = \text{Na} / \sqrt{(\text{Ca} + \text{Mg}) / 2}$$

Cuadro 2. Parámetros para el reuso del agua con interés desde el punto de vista agrícola

<i>Parámetro</i>	<i>Importancia para el regadío</i>	<i>Rango en efluentes procedente del tratamiento secundario y terciario</i>	<i>Objetivo tras el tratamiento para el reuso del agua con fines agrícolas</i>
Sólidos totales en suspensión	La medida de partículas se pueden relacionar con la contaminación microbiana; pueden interferir con la desinfección; obstrucción de los sistemas de regadío; deposición.	5-50 mg/L	<5-35TSS/L
Turbidez		1-30 NTU	<0.2-35NTU

DBO5	Substrato orgánico para el crecimiento microbiano; puede generar crecimiento bacteriano en los sistemas de distribución y deposición microbial (bio-fouling).	10-30mg/L	<5-45mgBOD/L
DQO		50-150mg/L	<20-200mgCOD/L
Coliformes totales	Medida del riesgo de infección debido a la presencia potencial de patógenos; puede dar lugar a bio-fouling.	<10- 10 ⁷ cfu/100mL	<1-200cfu/10mL
Metales pesados	Algunas sales disueltas son nutrientes beneficiosos para el crecimiento de la plata, mientras otros pueden ser fitotóxicos o convertirse en fitotóxicos a ciertas concentraciones. Elementos específicos (Cd, Ni, Hg, Zn, etc.) son tóxicos para plantas, y por lo tanto existen límites máximos de concentración de estos elementos para el agua utilizada para irrigación.		< 0.001mgHg/L <0.01mgCd/L <0.02-0.1mgNi/L
Inorgánicos	Alta salinidad y boro son dañinos para el agua de regadío de cultivos vulnerables.		<450- 4000mgTDS/L <1mgB/L

Cloro residual	Recomendado para prevenir el crecimiento bacteriano; la concentración excesiva de cloro libre (>0.05mg/L) puede dañar algunos cultivos vulnerables		0.5->5mgCl/L
Nitrógeno	Fertilizantes para regadío; puede contribuir a crecimiento bacteriano y eutrofización de depósitos de almacenamiento, corrosión(N-NH4) o incrustación (P)	10-30mgN/L	<10-15mgN/L
Fósforo		0.1-30mgP/L	<0.1-2mgP/L

Fuente: Akiçca, (1997).

7.10 Riesgo de salinidad

El exceso de sales es una de las mayores preocupaciones en la reutilización del agua para fines agrícolas. Un alto contenido en sales presentes en el agua supone un aporte de sales al suelo que sustenta la planta afectando la productividad del cultivo, degradando la estructura de la tierra y generando problemas de contaminación en las aguas subterráneas.

La conformidad del agua reciclada para su utilización en riego en relación con el contenido en sales dependerá de los siguientes factores:

- Tolerancia a la concentración de sal del cultivo del que se trate
- Características del suelo sometido a regadío

- Condiciones climáticas. La calidad del agua de riego juega un papel esencial en zonas áridas afectadas por evaporación alta que causan la acumulación de altas concentraciones de sales en el suelo
- Gestión del suelo y agua

En general el agua reciclada con fines de riego debe tener un bajo/ medio nivel de concentración en sales (conductividad eléctrica del orden de 0.6 a 1.7dS/m). (Akiçca, 1997)

Cuadro 3. Rangos de salinidad en el agua

Peligro	TDS (ppm o mg/L)	dS/m o mmhos/cm
Ninguno	<500	<0.75
Ligero	500-1000	0.75-1.5
Moderado	1000-2000	1.5-3.00
Severo	>2000	>3.0

Fuente: Vickers & Akiçca, (1997)

Niveles de salinidad moderados se pueden utilizar en ciertas ocasiones bajo condiciones de drenaje suficiente.

Aguas con alto contenido en sales ($EC_i > 1.5$) y sodio ($RAS > 6$) no deberán utilizarse para fines de riego. No obstante, en algunos países afectados por la disminución de los recursos hídricos, es práctica común utilizar como aguas de riego, aguas con alto contenido en sales como suplemento a otro tipo recursos hídricos. Por lo tanto, es esencial que el tipo de cultivo en estas zonas tenga alta tolerancia al contenido en sales de los suelos, así como otras prácticas de gestión.

Si se utiliza agua con alto contenido en sales en ciertas ocasiones en que haya escasez y limitación de recursos hídricos, el suelo debe ser permeable, el drenaje debe ser adecuado, la cantidad de agua aplicada debe ser mayor y el tipo de cultivos seleccionado debe tener la mayor tolerancia posible al exceso de sales. Se estima que un 21% del total de tierra sometida a regadío puede estar dañada por altos niveles de sal (Akicca, 1997).

Cuadro 4. Tolerancia relativa de varios cultivos a la salinidad

Bajo	Medio Bajo	Mediana	Alto
Frijol	Maíz	Rabiza	Cebada
Zanahoria	Maní	Sorgo	Pastos
Cebolla	Arroz	Soya	Trigo
Aguacate	Caña de azúcar	Sorgo Sudan	Varios Zacates
Limón	Trébol	Zacate Guinea	
	Batata	Remolacha	
	Brócoli	Lima	
	Repollo	Papaya	
	Coliflor	Plátano	
	Lechuga	Banano	
	Arvejas		
	Ají		
	Papa		
	Rabino		
	Espinaca		
	Tomate		
	Nabo		
	Pepino		

Fuente: Vickers & Akiçca, (1997)

En el siguiente cuadro se detalla el potencial de rendimientos del cultivo de frijol bajo niveles de salinidad de agua de riego (Eca) y niveles varios de salinidad del suelo (Ece) (Calidad de agua para Agricultura, No. 29, FAO)

Cuadro 5. Cultivos tolerantes a la salinidad y potencial de rendimiento

	Potencial de Rendimiento									
	100 %		90 %		75 %		50 %		0 %	
Cultivo	ECe	Eca	Ece	Eca	Ece	Eca	Ece	Eca	ECe	Eca
Frijol	1	0.7	1.5	1	2.3	1.5	3.6	2.4	6.3	4.2

Fuente: FAO

7.11 Peligro del sodio en aguas de regadío

Altos contenidos de iones de sodio en las aguas de regadío, afecta la permeabilidad del suelo y causa problemas de infiltración. Esto es porque el sodio cuando está presente en el suelo es intercambiable por otros iones. El calcio y el magnesio son cationes que forman parte de los complejos estructurales que forman el suelo generando una estructura granular apropiada para los cultivos. El exceso de iones de sodio desplaza el calcio (Ca) y magnesio (Mg) y provoca la dispersión y desagregación del suelo. El suelo se vuelve duro y compacto en condiciones secas y reduce la infiltración de agua y aire a través de los poros que conforman el suelo.

Este problema está igualmente relacionado con otros factores como el nivel de salinidad y el tipo de suelo. Por ejemplo, alto contenido de sodio en suelos arenosos no afecta tanto ya que éstos tienen una gran superficie de drenaje, en contra de otros suelos más compactos (Akicca, 1997).

7.12 Relación de absorción de sodio (RAS)

Expresa la relación entre los iones de sodio con respecto al calcio y el magnesio existente en el suelo. RAS se define con la siguiente ecuación:

$$\text{RAS} = [\text{CNa}] / [\sqrt{(\text{Ca} + \text{Mg})/2}]$$

Cuadro 6. Peligro de RAS en aguas de regadío

Peligro	RAS	Notas
Ninguno	< 3.0	Sin restricciones en el uso de agua reciclada para regadío
Ligero a moderado	3.0 - 9.0	De 3-6 ciertos cuidados a tener en cuenta en cultivos vulnerables. De 6-8 se debe usar yeso. No utilizar cultivos sensibles. Los suelos deben ser sometidos a muestreo y análisis cada uno o dos años para determinar si el agua es causante de un incremento de sodio.
Agudo	> 9.0	Daño severo. No conforme

Fuente: Vickers & Akiçca, (1997)

Los altos contenidos de carbonato y bicarbonato presentes en el agua causan la precipitación de calcio y magnesio e incrementan la concentración relativa de sodio siendo el índice RAS mayor. RAS calculado a través de las concentraciones de Na⁺, Ca⁺⁺, y Mg⁺⁺ en solución puede diferir de RAS real.

7.13 Elementos químicos fitotóxicos en aguas de regadío

Los iones tóxicos más comunes presentes en las aguas residuales son: Boro, Cloro y Sodio.

El sodio y el cloro son normalmente absorbidos por la raíz. La absorción a través de las hojas produce una mayor acumulación de estos compuestos en las plantas. Una absorción directa normalmente ocurre a través de los sistemas de riego por aspersión a altas temperaturas y valores de humedad bajos. La concentración adecuada de estos aniones depende del tipo de cultivo, el estado de crecimiento, concentración de los iones tóxicos y combinación de los mismos, clima y condiciones particulares del tipo de suelo (Morris & Devitt, 2008).

Cuadro 7. Niveles tóxicos de iones específicos (meq/l)

	Boro	Cloro	Sodio
Ninguno	< 1	1 – 3	> 3
Ligero a moderado	< 4	4 – 10	> 10
Severo	< 3	3 – 9	> 9

Fuente: Morris & Devitt. Sampling and interpretation of landscape irrigation water, University of Nevada

Las concentraciones de boro menores de 1 mg/L son esenciales para el desarrollo de la planta, pero altas concentraciones pueden suponer un problema en plantas sensibles. La mayoría de las plantas pueden tener problemas de toxicidad cuando la concentración de boro excede 2mg/L.

La mayor fuente de boro antropogénico son los efluentes domésticos (media de 1 mg/L) debido al uso de productos como el perborato como agente blanqueante con una media de 1mg/L (el boro que se encuentra en aguas residuales puede tener concentraciones de boro de hasta 5mg/L en países secos y aguas residuales concentradas). Ambos, el suelo utilizado en los cultivos y el agua de riego, deberán ser sometidos a examen para determinar la presencia de tóxicos que puedan afectar a la planta como el boro (Morris & Devitt, 2008).

8. MARCO REFERENCIAL

8.1 ANTECEDENTES

En la planta de tratamiento de aguas residuales Aurora II se han realizado investigaciones relacionadas con el presente tema de investigación, entre los que se mencionan a continuación.

Ruano (2005) concluyó:

- En general, indistintamente de la contaminación bacteriológica, las características agronómicas (altura de planta, vigor y respuesta a plagas y enfermedades), calidad del pasto (jugosidad, textura, coloración) y producción de biomasa verde, se consideran adecuados, respecto a las mismas características al utilizar agua convencional para riego.
- El proceso de sedimentación primaria de las aguas residuales para su uso en el riego permitió las reducciones de coliformes totales, coliformes fecales, DQO DBO, y sólidos suspendidos en 54, 58, 21, 26 y 29%, respectivamente.

Cuadro 8. Parámetros fisicoquímicos y biológicos de la planta de tratamiento Aurora II

Período	Coliformes totales NMP/100 ml	Coliformes fecales NMP/100 ml	DQO mg/l	DBO mg/l	Sólidos suspendidos mg/l
Antes del sedimentador	2400000	1100000	504	201	158
Después del sedimentador	1100000	460000	399	148	111

Fuente: Ruano, (2005)

García (2006) concluyó:

- Los efluentes podrían ser utilizados para regar cultivos que no sean susceptibles al sodio y que sean medianamente tolerantes a la salinidad, ya que su clasificación C2S2 –mediana salinidad y mediano contenido de sodio- les permite ser utilizados en otros cultivos tales como algunos cereales –sorgo, trigo-, especies forestales –casia, eucalipto, leucaena, casuarina- y algunos pastos de corte. Además su contenido de fósforo y nitrógeno reduce los costos por concepto de uso de fertilizantes químicos.
- Los efluentes de los sistemas evaluados pueden ser aprovechados para el riego de cultivos como pastos, cereales y árboles ya que, en el caso de cultivos para consumo en fresco, deberá hacerse una desinfección del efluente antes de ser utilizado.
- El reuso de agua residual es una alternativa viable para aquellos lugares donde el recurso hídrico es limitado, sin embargo, deben cuidarse los impactos negativos, tales como el deterioro de la calidad del suelo por presencia de sales y el deterioro de la salud humana por presencia de organismos patógenos.

8.2 Datos promedio obtenidos del proceso de tratamiento de la planta Aurora II

Los resultados presentados en el siguiente cuadro fueron obtenidos mediante un promedio de cuatro muestreos realizados por estudiantes de la ERIS durante el año 2003. Estos parámetros físicoquímicos y microbiológicos, se analizaron

en el laboratorio unificado de química y microbiología sanitaria “Dra. Alba Tabarini”, realizados por el Ingeniero Edwin Manuel Ortiz Castillo.

**Cuadro 9. Análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos
Aurora II**

Parámetro	Concentración en mg/l		
	Entrada Sedimentador	Salida sedimentador	Salida primer filtro
DBO ₅	396	241	142
DQO	571	361	201
Coliformes totales NMP/100 cm ³	7.61 x10 ¹⁷	7.51 x10 ¹⁷	1.48 x10 ⁸
Coliformes fecales NMP/100 cm ³	2.95 x10 ¹⁵	2.92 x10 ¹⁵	7.7 x10 ⁷
pH	7.04	7.24	7.27
Conductividad eléctrica µm	712	688	590
N-total mg/l	57.07	44.11	33.68
Turbiedad UTN	88.67	79.37	32.97
Sólidos suspendidos totales SST	350	290	187

Fuente: Elaboración propia.

8.3 REGLAMENTO DE LAS DESCARGAS Y REUSO DE AGUAS RESIDUALES Y DE LA DISPOSICIÓN DE LODOS (236-2006)

8.3.1 Parámetros y límites máximos permisibles para el reuso de aguas residuales

Tipo I: Reuso para riego agrícola en general: uso de un efluente que debido a los nutrientes que posee se puede utilizar en el riego extensivo e intensivo, a manera de fertirriego, para recuperación y mejoramiento de suelos y como fertilizante en plantaciones de cultivos que, previamente a su consumo, requieren de un proceso industrial, de conformidad con los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 35. Se exceptúa de este reuso los cultivos considerados en el tipo II.

Tipo II: Reuso para cultivos comestibles: con restricciones en el riego de áreas con cultivos comestibles que se consumen crudos o precocidos, como hortalizas y frutas. Para el caso de coliformes fecales y demanda bioquímica de oxígeno, deberá cumplirse de conformidad con los límites máximos permisibles del artículo 35. Adicionalmente, para otros parámetros, deberán cumplir los límites máximos permisibles presentados en el cuadro del artículo 21 del reglamento, a excepción de sólidos en suspensión, nitrógeno total y fósforo total.

Cuadro 10. Parámetros y límites máximos permisibles para el reuso

Tipo de reuso	DBO ₅ mg/l	Coliformes fecales, NMP/100 ml
Tipo I	No aplica	No aplica
Tipo II	No aplica	<2x10 ²

Fuente: Reglamento 236-2006

Cuadro 11. Límites máximos permisibles

Parámetros	Dimensionales	Límites máximos permisibles
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	20
Fósforo total	Miligramos por litro	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	< 1x10 ⁴
Arsénico	Miligramos por litro	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	1
Cobre	Miligramos por litro	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.01
Níquel	Miligramos por litro	2
Plomo	Miligramos por litro	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10
Color	Unidades platino cobalto	500

TCR = temperatura del cuerpo receptor, en grados Celsius.

Fuente: Reglamento 236-2006

En el siguiente cuadro se presentan las restricciones de cultivos en función del tipo de agua y método de riego para el caso del valle de Mezquital, Hidalgo, México.

Cuadro 12. Restricción de cultivos en función del tipo de agua y método de riego

Tipo de agua	Riego por surcos		Riego por inundación		Riego por aspersión	
	Cultivos no permitidos	Intervalo mínimo riego – cosecha	Cultivos no permitidos	Intervalo mínimo riego - cosecha	Cultivos no permitidos	Intervalo mínimo riego - cosecha
Tipo 1. <1,000 coliformes totales NMP/100ml 0 (cero) huevos de helmintos variables por litro	Hortalizas que se consumen crudas excepto ajo, pepino, tomate verde, jicama, melón y sandía. Fresa y zarzamora.	15	Hortalizas que se consumen crudas excepto ajo, pepino, tomate verde, jicama, melón y sandía. Fresa y zarzamora	20	Hortalizas que se consumen crudas excepto ajo, pepino, tomate verde, jicama, melón y sandía. Fresa y zarzamora	20
Tipo 2 <1,000 coliformes fecales NMP/100ml. <1 huevo de helminto variable por litro.	Hortalizas que se consumen crudas excepto ajo, pepino, tomate verde, jicama, melón y sandía. Fresa y zarzamora.	20	Hortalizas que se consumen crudas, excepto melón y sandía.	20	Hortalizas y frutales en general	20
Tipo 3. 1.001-100.000 coliformes fecales NMP/100 ml	Hortalizas que se consumen crudas, excepto melón y sandía. Fresa, zarzamora y jicama.	20	Hortalizas que se consumen crudas, excepto jicama, melón, sandía. Fresa, zarzamora,	20	Hortalizas y frutales en general.	20
Tipo 4. >100.000 coliformes fecales NMP/100 ml	Hortalizas y frutales en general.	20	Hortalizas y frutales en general.	20	Hortalizas y frutales en general.	20

Fuente: Comisión nacional del agua, México, 1991.

8.4 Ubicación de la investigación

La planta piloto de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos –ERIS– está ubicada en la colonia Militar Aurora II en la zona 13. Limitada al Norte con el Observatorio Nacional, al Este con el Aeropuerto Internacional “La Aurora” y al Sur y Oeste con barrancos. Siendo su ubicación $14^{\circ} 35''$ de latitud Norte y $90^{\circ} 32''$ de longitud Oeste. La altitud varía desde 1455 MSNM en la parte más baja y 1502 MSNM en la parte más alta.

Actualmente se cuenta con los sistemas de tratamiento siguientes:

- Vía 1 Filtros percoladores que tratan 0.12 l/s
- Vía 2 Reactor anaerobio de flujo ascendente 0.88 l/s
- Vía 3 Riego de pasto después de sedimentación primaria .0.1 l/s
- Vía 4 Reactor Anaerobio de flujo ascendente utilizando unidades prefabricadas
de plástico $Q = 0.05$ l/s.
- Vía 5 Sistema de Lagunas $Q = 3.0$ l/s

El agua residual a tratar se distribuye y conduce a las diferentes unidades por medio de canales y tuberías de asbesto–cemento y PVC. Las unidades de las que consta la Planta según las vías de tratamiento son:

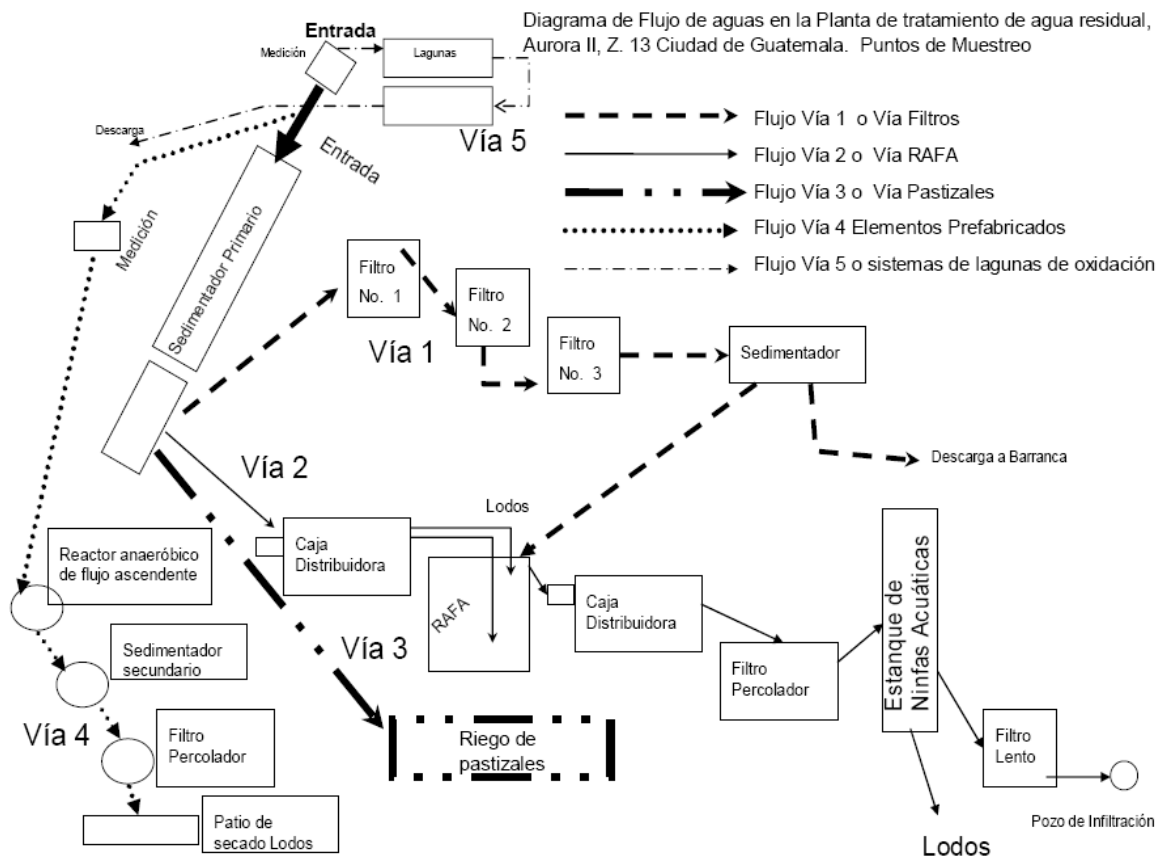


Figura 1. Diagrama de flujo de agua en la planta de tratamiento de agua residual Aurora II

Fuente: Solares, (2006).

8.5 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL EXPERIMENTAL

8.5.1 Frijol (*Phaseolus vulgaris*, L.)

Dentro del grupo de las especies leguminosas, el frijol común es una de las más importantes. Es una planta anual, herbácea intensamente cultivada desde la zona tropical hasta las templadas. Es originario de América y se le conoce con diferentes nombres: poroto, haricot, caraota, judía, aluvia, habichuela y otros.

El frijol es uno de los alimentos básicos en la dieta y es la principal fuente de proteína; es rico en lisina pero deficiente en los aminoácidos azufrados metionina, cistina y triptófano; por lo cual una dieta adecuada en aminoácidos esenciales se logra al combinar frijol con cereales (arroz, maíz, otros). La variedad de frijol que se trabajo en la investigación fue ICTA ligero.

8.5.2 Clima y suelos

El frijol se adapta bien desde 200 hasta 1.500 msnm. El cultivo necesita entre 300 a 400 mm de lluvia. La falta de agua durante las etapas de floración, formación y llenado de vainas afecta seriamente el rendimiento. El exceso de humedad afecta el desarrollo de la planta y favorece el ataque de gran número de enfermedades.

Se recomienda que los suelos para el cultivo de frijol sean profundos, fértiles, preferiblemente de origen volcánico con no menos de 1,5% de materia orgánica en la capa arable y de textura liviana con no más de 40% de arcilla como los de textura franco, franco limosos y franco arcilloso ya que el buen drenaje y la aereación son fundamentales para un buen rendimiento de este cultivo. Se debe evitar sembrar en suelos ácidos, con contenidos altos en manganeso y aluminio y bajos en elementos menores. El pH óptimo para frijol está comprendido entre 6,5 y 7,5 aunque es tolerante a pH entre 4,5 y 8,2. Los terrenos deben ser preferiblemente ondulados o ligeramente ondulados.

8.5.3 Sedimentador Primario

Este es un estanque de remoción de sólidos, los sólidos sedimentables se depositan en el fondo, los cuales son extraídos por diferencia en la presión hidrostática.

Cuadro 13. Dimensiones del sedimentador primario

Descripción	Dimensión
Ancho	1 m
Largo	7.50 m
Profundidad: Caudal medio a tratar	3.60 m ³ /h
Período de retención	2 h

Fuente: García, (2006).

Del sedimentador primario salen las vías 1, 2 y 3 de tratamiento.

8.5.4 Batería de filtros colocados en serie de mediana altura

El afluente del sedimentador primario pasa a la primera unidad de filtración por medio de una tubería de PVC de 3 pulgadas de diámetro, esta misma clase de tubería comunica a las otras dos unidades de tratamiento, haciendo un total de tres filtros percoladores colocados en serie.

Cada filtro percolador consiste de un lecho formado por medio rocoso sumamente permeable al que se adhieren los microorganismos y a través del cual percola el agua residual. El primer filtro tiene un área de 0.40 m² y una altura de 3.33 m, donde el agua residual se distribuye uniformemente sobre la superficie del lecho filtrante.

Al rociar el agua servida en la parte superior del lecho filtrante el afluente del tercer filtro descarga en el sedimentador secundario, tipo Dortmund, donde se deposita la materia orgánica que se ha desprendido de los filtros.

8.5.5 Filtro percolador con ripio

Este filtro consiste en un tanque metálico cilíndrico de 0.57 m de diámetro y 2.08 m de altura. El sistema filtrante es material de desecho de construcción (ripió clasificado de concreto). Este medio filtrante permite la depuración del agua residual proveniente del sedimentador primario de manera aerobia. En algunas partes del documento a este filtro se le puede encontrar como filtro experimental.

9. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la investigación se realizaron cuatro fases

- Fase de gabinete inicial
- Fase de campo
- Fase de laboratorio
- Fase de gabinete final

9.1 FASE DE GABINETE INICIAL

En esta fase se recopiló toda la información necesaria para dirigir en forma adecuada la investigación. Para esta fase se realizó una revisión bibliográfica en la biblioteca de la ERIS, internet, libros, entre otros.

9.2 FASE DE CAMPO

La fase de campo inició desde la preparación del área física de la investigación hasta la toma de resultados. Esta fase duró aproximadamente tres meses.

El cultivo que se trabajó en la investigación es frijol (*Phaseolus vulgaris*, L.), se sembró una semilla en cada bolsa de polietileno dejando únicamente una planta diez días después de la germinación. El sustrato utilizado fue turba de tal manera que los resultados obtenidos se deban al tipo de agua utilizada (como tratamientos) y no a la calidad del suelo.

9.2.1 Factor que se evaluó

- Efluentes de agua residual provenientes de la colonia Aurora II

9.2.2 Diseño experimental

La información se obtuvo de los resultados brindados por cada uno de los tratamientos y sus respectivas repeticiones para lo cual se utilizó un diseño experimental. El diseño estadístico utilizado fue el de bloques al azar debido a que existe una gradiente de variabilidad donde se realizó la investigación la cual es el trayecto del sol. El modelo estadístico para el diseño de bloques al azar es $y_{ij} = \mu + T_i + B_j + E_{ij}$. El número de tratamientos en total fueron cinco incluyendo el control o testigo al cual se le aplicará únicamente agua potable, el número de repeticiones fueron cinco.

9.2.3 Tratamientos

Número de tratamientos= 5

Número de repeticiones= 5

Número de unidades experimentales= 25

Cuadro 14. Descripción de los tratamientos y repeticiones

Descripción tratamiento	Abreviación tratamiento
Efluente entrada al sedimentador primario	T1
Salida del sedimentador primario	T2
Salida primer filtro	T3
Salida filtro percolador con ripio	T4
Agua potable	T5

9.2.4 Unidad experimental

Cada unidad experimental consistió de 2 plantas de frijol, habiendo un total de 25 unidades experimentales, por lo tanto 50 plantas de frijol en total.

9.2.5 Unidad de muestreo

Debido a que las plantas se desecharon por destrucción de las mismas en el momento de tomar los datos, se utilizó únicamente una planta por unidad experimental, tomándose esta en forma aleatoria dentro de cada unidad experimental.

9.2.6 Modelo estadístico

$$Y_{ij} = U + A_i + B_j + E_{ijk}$$

Donde:

Y_{ij} = Variable de respuesta observada en la ij -ésima unidad experimental

U = Efecto de la media general

A_i = Efecto del i -ésimo tratamiento

B_j = Efecto del j -ésimo bloque

E_{ijk} = Error experimental en la ij -ésima unidad experimental

9.2.7 Variables de respuesta

Después de transcurridos tres meses a partir de la siembra se midió la altura de las plantas, biomasa fresca de la parte aérea, biomasa fresca de la raíz, biomasa seca de la parte aérea, biomasa seca de la raíz y número de frutos.

9.2.8 Manejo del experimento

El manejo que se le dio al experimento fue similar al manejo agronómico general que se aplica en el país para que los resultados obtenidos se apliquen a la realidad nacional, variando únicamente las concentraciones de elementos presentes en los efluentes a utilizar. El riego se realizó tres veces por semana aplicando un volumen de un litro por planta por riego. Cabe mencionar que no se utilizó fertilizante en el cultivo.

9.3 FASE DE LABORATORIO

Se realizó un muestreo puntual en los cuatro puntos de muestreo de la planta de tratamiento (entrada sedimentador, salida sedimentador, salida primer filtro percolador, salida filtro experimental) y también se realizó un muestreo en agua potable. En el laboratorio Química y Microbiología Sanitaria de la Facultad de Ingeniería, USAC se realizó el análisis microbiológico, en donde se determinó sólidos totales en suspensión, coliformes totales y coliformes fecales. Para el grupo coliforme se utilizó la técnica de tubos múltiples de fermentación. En el laboratorio de Suelo y Agua de la Facultad de Agronomía, USAC, se realizó el análisis químico de las muestras.

9.4 FASE DE GABINETE FINAL

9.4.1 Análisis de los datos

A las variables de respuesta se les realizó un análisis de varianza auxiliándose del programa de computación InfoStat, determinándose así la existencia o no existencia de diferencia significativa entre tratamientos, posteriormente, las medias de los tratamientos fueron sometidos a una prueba múltiple de medias usando el comparador de TUKEY al 5% de significancia.

10.RESULTADOS Y DISCUSIONES

10.1 Altura de las plantas

En el siguiente cuadro se muestran los resultados del Análisis de Varianza (ANDEVA) obtenidos al utilizar el programa InfoStat para la variable de respuesta altura de plantas, con un nivel de confianza de 0.95 y un 0.05 de significancia estadística.

Cuadro 15. ANDEVA para Altura de plantas (H)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
H	25	0.67	0.50	14.06

Cuadro de Análisis de la Varianza					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	148.56	8	18.57	3.98	0.0090
Trat	112.79	4	28.20	6.04	0.0037
Bloque	35.77	4	8.94	1.92	0.1569
Error	74.69	16	4.67		
Total	223.25	24			

Tukey Alfa=0.05 DMS=4.18672

Error: 4.6681 gl: 16

Trat	Medias	n		
3.00	17.34	5	A	
2.00	17.16	5	A	
4.00	15.54	5	A	B
1.00	15.36	5	A	B
5.00	11.44	5		B

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0.05)

Donde:

H: altura de plantas

N: número de datos observados

R²: Coeficiente de determinación

R² Aj: coeficiente de determinación ajustado
CV: coeficiente de variación
FV: fuentes de variación
SC: suma de cuadrados
gl: grados de libertad
CM: cuadrados medios
F: valor de f calculada
p-valor: significancia real

En la fila de tratamientos (Trat) en el cuadro de Análisis de la Varianza se observa que el valor de p-valor es de 0.0037, siendo un valor inferior al 0.05 de significancia, por lo tanto existe diferencia significativa entre los cinco tratamientos (agua residual entrada al sedimentador, salida del sedimentador, salida del primer filtro, salida del filtro percolador con ripio, agua potable).

Al determinar la existencia de diferencia significativa se procedió a realizar una prueba múltiple de medias Tukey para obtener el mejor o los mejores tratamientos. En el cuadro Tukey con un alfa de 0.05 se observa que estadísticamente los mejores tratamientos son 1, 2, 3, y 4 por pertenecer al grupo A, aunque la media superior pertenece al tratamiento 3 (salida primer filtro) con una altura de 17.34 cm. El grupo con las medias más bajas es el B al cual pertenecen los tratamientos 1, 4 y 5 en donde la media inferior la presenta el tratamiento 5 (agua potable) con una altura de 11.44 cm.

T1: Agua residual de la entrada al sedimentador primario
T2: Agua residual en la salida del sedimentador primario
T3: Agua residual en la salida del primer filtro
T4: Agua residual en la salida del filtro percolador con ripio
T5: Agua potable

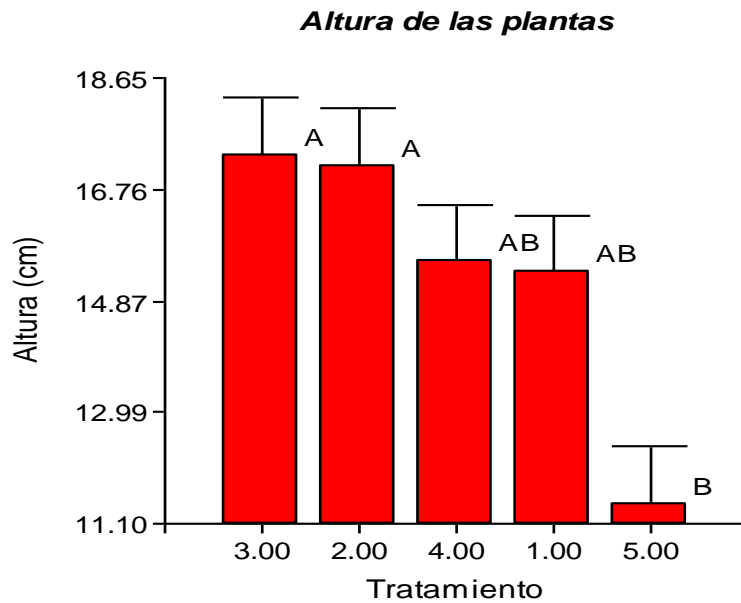


Figura 2. Comparación de medias de la variable longitud aérea

La figura 2 es el resultado de la comparación de medias de Tukey para la variable de respuesta longitud aérea. Los tratamientos 3 y 2 (salida del primer filtro percolador y salida del sedimentador primario respectivamente) presentan las medias más altas. A ambos tratamientos le siguen los tratamientos 4 y 1 (salida del filtro percolador con ripio y entrada al sedimentador primario) y finalmente se tiene el tratamiento 5 (agua potable) con la media más baja. Letras iguales en el gráfico indican que no existe diferencia significativa entre los tratamientos.

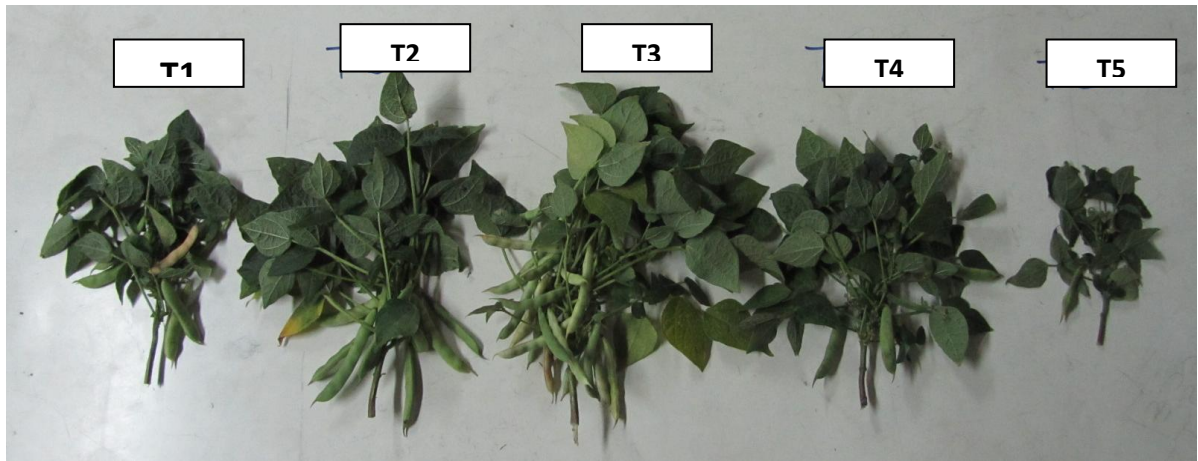


Figura 3. Altura de plantas

En las dos figuras anteriores se observa la altura de las plantas, en donde la media superior pertenece al tratamiento 3 (salida primer filtro percolador) seguido por el tratamiento 2 (salida del sedimentador). La media inferior la presenta el tratamiento 5 (agua potable) con un valor de 11.44 centímetros.

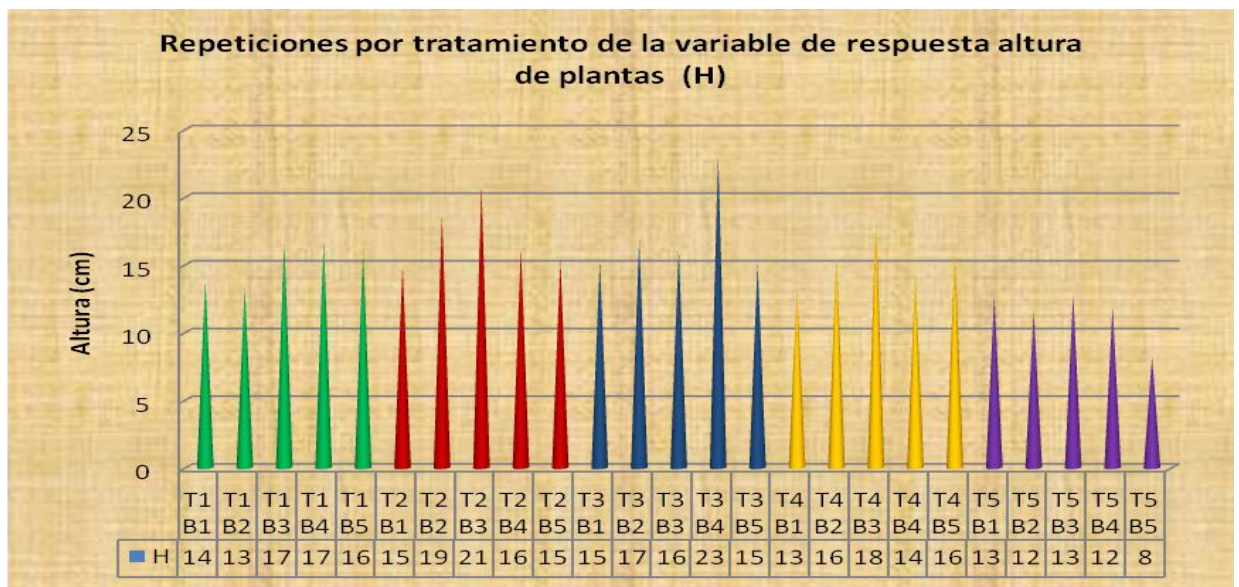


Figura 4. Repeticiones de los tratamientos de la variable de respuesta Altura de Plantas (H).

En la figura anterior se observa la variación de los datos por cada tratamiento, siendo los bloques (B) las repeticiones. Cada color pertenece a un tipo de tratamiento (T). Esta variación dentro de cada tratamiento se debe a la naturaleza de las plantas, hay factores que no se pueden controlar como el factor genético, entre otros. Esta variación de las repeticiones de cada tratamiento para el caso de la variable de respuesta altura de plantas (H) se observa en el cuadro 15 en donde el coeficiente de variación (CV) es de 14.06%. No existe ninguna regla desde el punto de vista estadístico que obligue a obtener un coeficiente de variación inferior a un determinado valor. Este CV depende del fenómeno que se esté investigando. En este caso lo interesante es determinar si existe o no diferencia significativa.

10.2 Biomasa Fresca Aérea

En el siguiente cuadro se muestra el Análisis de Varianza para la variable de respuesta Biomasa Fresca Aérea (BFA) y la prueba múltiple de medias Tukey

Cuadro 16. ANDEVA para Biomasa Fresca Aerea (BFA)

Variable	N	R ²	R ² A _j	CV
BFA	25	0.56	0.34	47.76

Cuadro de Análisis de la Varianza

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	10940.69	8	1367.59	2.57	0.0514
Trat	8439.26	4	2109.82	3.97	0.0201
Bloque	2501.42	4	625.36	1.18	0.3585
Error	8510.19	16	531.89		
Total	19450.87	24			

Tukey Alfa=0.05 DMS=44.69029
Error: 531.8866 gl: 16

Trat	Medias	n		
2.00	72.92	5	A	
3.00	65.25	5	A	B
4.00	43.37	5	A	B
1.00	36.92	5	A	B
5.00	22.98	5		B

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0.05)

En el cuadro de Análisis de la Varianza para la variable de respuesta Biomasa Fresca Aérea (BFA) se observa que en la fila de tratamientos existe diferencia significativa entre tratamientos con un p-valor de 0.0201 siendo inferior a 0.05 de significancia.

Según Tukey entre los tratamientos 1, 2, 3, y 4 no existe diferencia al 0.05 de significancia pero el valor medio superior lo presenta el tratamiento 2 (Salida sedimentador primario) con un valor de 72.92 gramos. El valor inferior lo presenta el tratamiento 5 (agua potable) con un valor de 22.98 gramos.

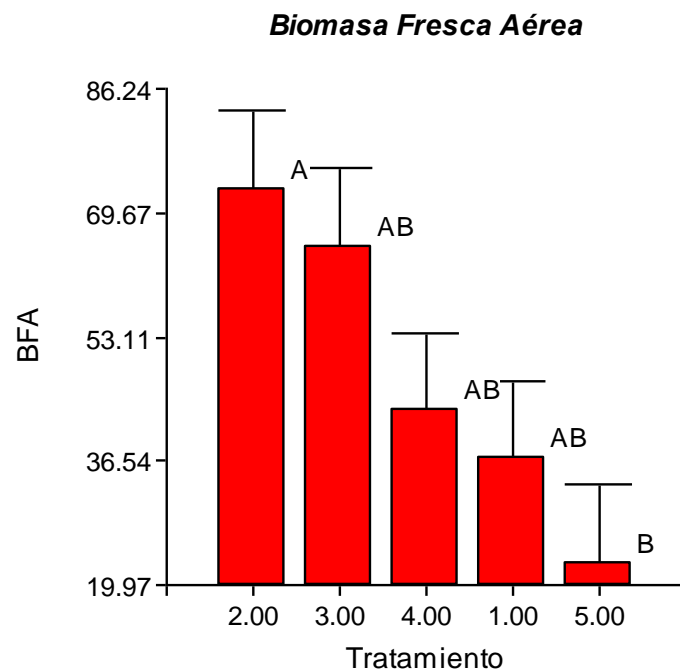


Figura 5. Comparación de medias de la variable biomasa fresca aérea

La figura 5 representa las medias de los tratamientos para la variable de respuesta biomasa fresca aérea. La media superior con letra A pertenece al tratamiento 2 (salida del sedimentador primario).

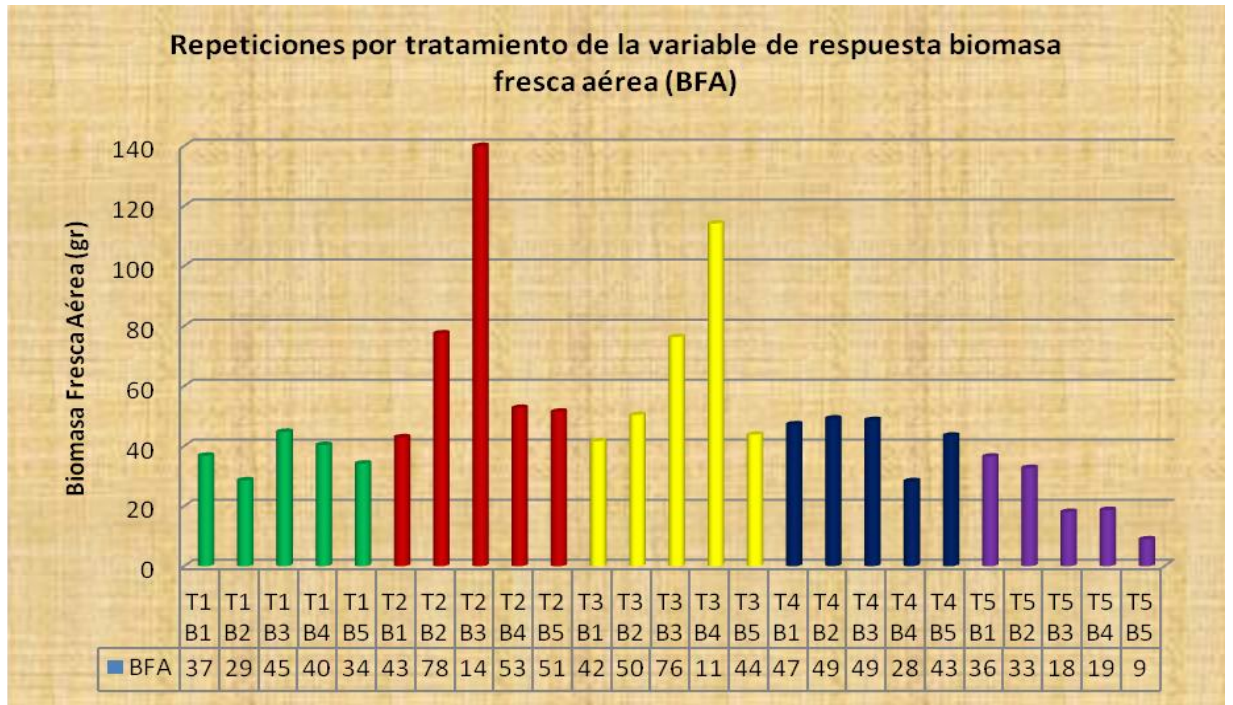


Figura 6. Repeticiones de los tratamientos de la variable de respuesta Biomasa Fresca Aérea (BFA)

En la figura anterior se observa que la variación principalmente en el tratamiento 2 y 3 es mayor, debido a esta variación el coeficiente de variación es mayor, $CV=47.76\%$ (ver cuadro 16). Esta variación a como se mencionó anteriormente, se deben a factores que no se pueden controlar en la investigación.

10.3 Biomasa Fresca Radicular

En el siguiente cuadro se presentan los resultados del análisis de la varianza y prueba múltiple de medias Tukey para la variable de respuesta Biomasa Fresca Radicular (BFR)

Cuadro 17. ANDEVA para la variable Biomasa Fresca Radicular (BFR)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
BFR	25	0.54	0.31	29.25

Cuadro de Análisis de la Varianza					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	8.92	8	1.12	2.38	0.0668
Trat	6.26	4	1.56	3.34	0.0362
Bloque	2.66	4	0.67	1.42	0.2729
Error	7.51	16	0.47		
Total	16.43	24			

Tukey Alfa=0.05 DMS=1.32723				
<i>Error: 0.4691 gl: 16</i>				
Trat	Medias	n		
4.00	2.89	5	A	
2.00	2.70	5	A	B
3.00	2.49	5	A	B
1.00	2.16	5	A	B
5.00	1.46	5		B

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0.05)

En el cuadro de Análisis de la Varianza para la variable Biomasa Fresca Radicular (BFR), los tratamientos presentan significancia estadística con un valor de 0.0362, siendo este inferior a 0.05 de significancia. Al existir diferencia significativa entre los tratamientos se procede a realizar una prueba múltiple de medias.

En el cuadro de prueba múltiple de medias Tukey se presentan los valores de las medias de los cinco tratamientos siendo los mejores el 1, 2, 3, y 4 no habiendo diferencia estadística entre ellos pero el mejor tratamiento es el 4 (salida filtro percolador con ripio) con una media de 2.89 gramos. El tratamiento que presenta la media más baja es el 5 (agua potable) con un valor de 1.46 gramos.

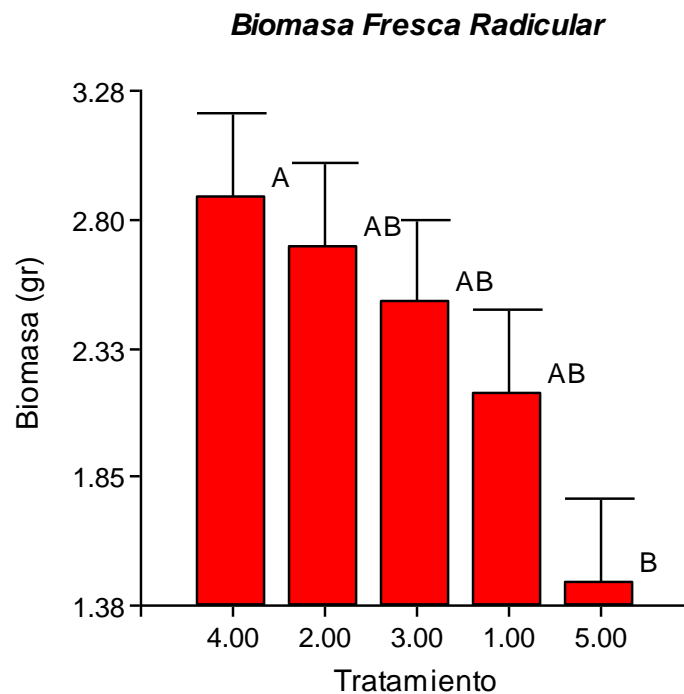


Figura 7. Comparación de medias de la variable biomasa fresca radicular

En este gráfico se observa que el tratamiento 4 (salida del filtro percolador con ripio) presenta la media superior seguido por el tratamiento 2 (salida sedimentador primario). Tratamientos que poseen la letra A son los superiores y los que poseen la letra B pertenecen al grupo inferior.

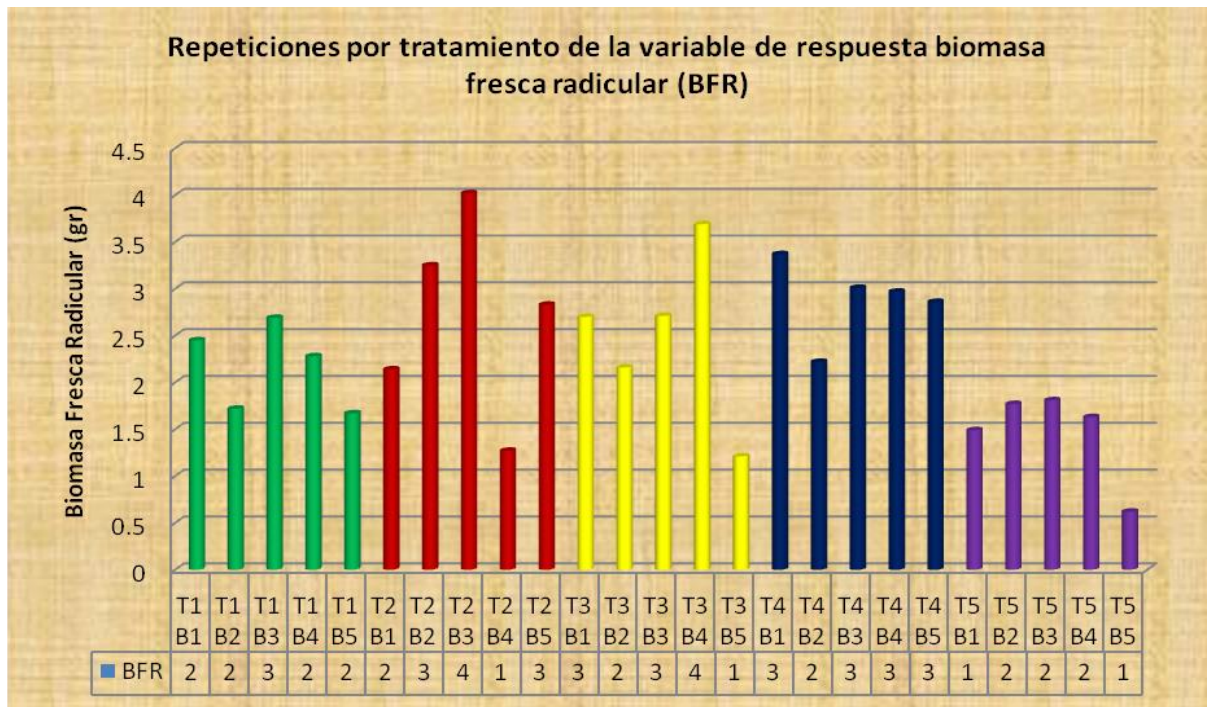


Figura 8. Repeticiones de los tratamientos de la variable de respuesta Biomasa Fresca Radicular (BFR).

La variación en la variable de respuesta BFR es de 29.25% (ver cuadro 17). Los valores de BFR que se observan en la figura anterior son valores aproximados debido al espacio limitado dentro del gráfico, los datos exactos se encuentran en anexos, en datos de campo.

10.4 Biomasa Seca Aérea

Cuadro 18. ANDEVA para la variable Biomasa Seca Aerea (BSA)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
BSA	25	0.59	0.39	35.07

Cuadro de Análisis de la Varianza

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	565.85	8	70.73	2.93	0.0318
Trat	449.67	4	112.42	4.66	0.0109
Bloque	116.18	4	29.05	1.21	0.3469
Error	385.62	16	24.10		
Total	951.47	24			

Tukey Alfa=0.05 DMS=9.51315
Error: 24.1013 gl: 16

Trat	Medias	n		
2.00	19.51	5	A	
3.00	16.89	5	A	
4.00	13.40	5	A	B
1.00	13.28	5	A	B
5.00	6.90	5		B

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0.05)

Para obtener la biomasa seca se procedió a secar las plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en un horno durante 48 horas a una temperatura de 65 grados Celsius. El propósito es obtener la masa únicamente del material orgánico sin tomar en cuenta la cantidad de agua presente en el tejido vegetal.

Según el Análisis de la Varianza existe diferencia significativa entre tratamientos debido a que el p-valor es de 0.0109, siendo inferior al 0.05 de significancia.

Para poder determinar cuál es el mejor o los mejores tratamientos se realizó una prueba múltiple de medias Tukey al 0.05 de significancia, siendo los mejores tratamientos el 1, 2, 3, y 4. El valor medio superior pertenece al tratamiento 2 (salida del sedimentador primario) con un valor de 19.51 gramos y el valor medio inferior lo pertenece al tratamiento 5 (agua potable) con un valor de 6.90 gramos.

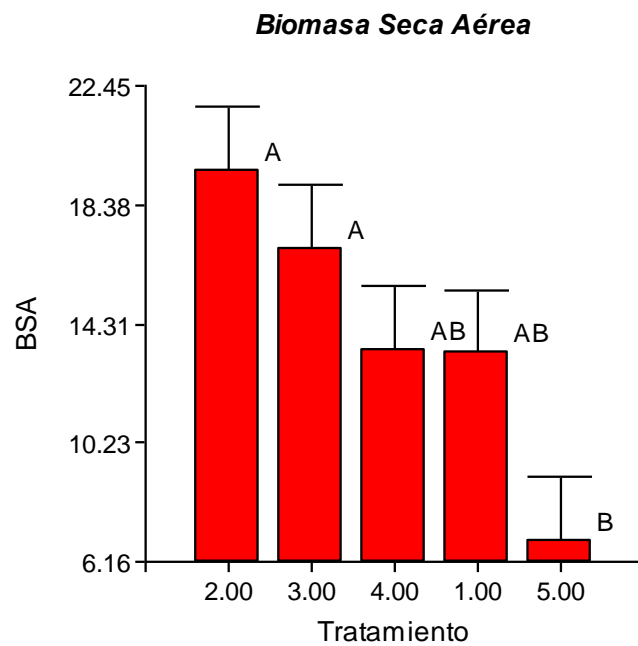


Figura 9. Comparación de medias de la variable biomasa seca aérea

Para el caso de la figura 9 los mejores tratamientos son siempre el 2 y el 3 (salida sedimentador primario y salida primer filtro percolador respectivamente).

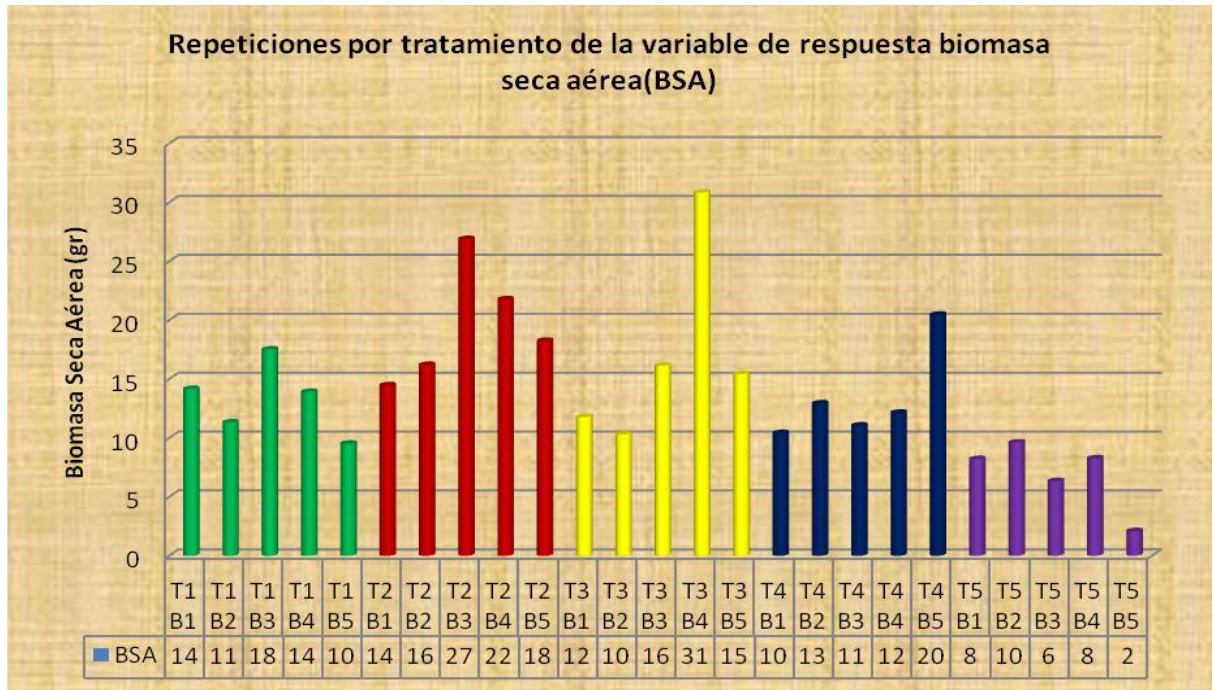


Figura 10. Repeticiones de los tratamientos de la variable de respuesta Biomasa Seca Aérea (BSA).

Según la figura anterior, los tratamientos 2 y 3 presentan mayor variación, por esta razón el coeficiente de variación la variable de respuesta BSA es de 35.07% (ver cuadro 18).

10.5 Biomasa Seca Radicular

Cuadro 19. ANDEVA para la variable Biomasa Seca Radicular (BSR)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
BSR	25	0.55	0.33	32.00

Cuadro de Análisis de la Varianza

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.97	8	0.12	2.45	0.0609
Trat	0.80	4	0.20	4.06	0.0184
Bloque	0.16	4	0.04	0.83	0.5280
Error	0.79	16	0.05		
Total	1.76	24			

Tukey Alfa=0.05 DMS=0.43078
Error: 0.0494 gl: 16

Trat	Medias	n		
4.00	0.87	5	A	
2.00	0.82	5	A	
3.00	0.78	5	A	B
1.00	0.63	5	A	B
5.00	0.38	5		B

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0.05)

Para el caso de la variable biomasa seca radicular existe diferencia significativa debido a que el p-valor de los tratamientos es de 0.0184 siendo un valor inferior a 0.05, condición para que exista diferencia entre tratamientos.

En la prueba múltiple de medias Tukey al 0.05 de significancia, los tratamientos 1, 2, 3 y 4 estadísticamente son iguales, aunque el tratamiento 4 (salida filtro percolador con ripio) presenta una media más alta de 0.87 gramos. El tratamiento con una media inferior es el 5 (agua potable).

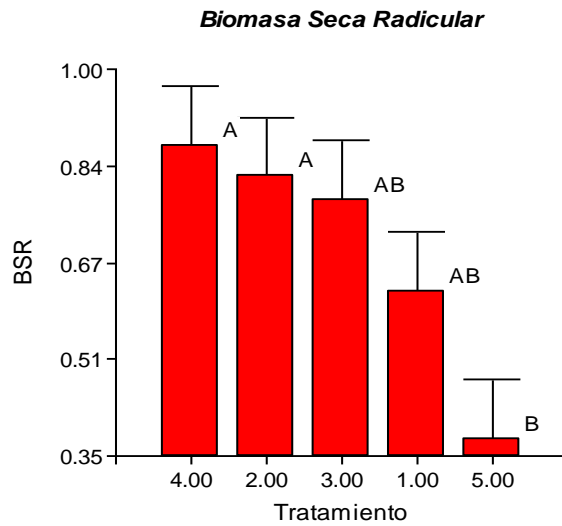


Figura 11. Comparación de medias de la variable biomasa seca radicular

La presente figura muestra que las medias superiores para la variable de respuesta biomasa seca radicular pertenecen a los tratamientos 4 y 2. La media inferior siempre la presenta el tratamiento 5.

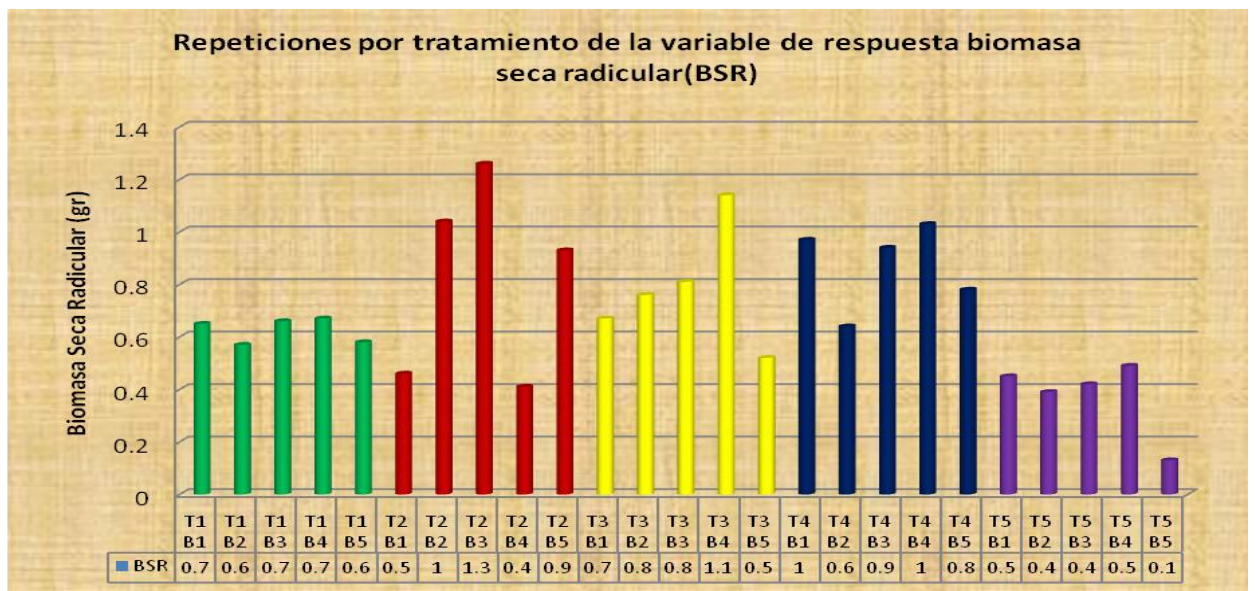


Figura 12. Repeticiones de los tratamientos de la variable de respuesta Biomasa Seca Radicular (BSR).

En el tratamiento 2 se observa una mayor variación de las repeticiones, obteniéndose un coeficiente de variación de la variable de respuesta BSR de 32% (ver cuadro 19).

10.6 Número de frutos

Cuadro 20. ANDEVA para la variable Número de Frutos (NF)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
NF	25	0.48	0.22	45.93

Cuadro de Análisis de la Varianza

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	454.00	8	56.75	1.87	0.1367
Trat	333.20	4	83.30	2.74	0.0653
Bloque	120.80	4	30.20	0.99	0.4390
Error	486.00	16	30.38		
Total	940.00	24			

Tukey Alfa=0.05 DMS=10.67977
Error: 30.3750 gl: 16

Trat	Medias	n	
3.00	16.00	5	A
2.00	15.00	5	A
4.00	12.80	5	A
1.00	10.40	5	A
5.00	5.80	5	A

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0.05)

En la única variable de respuesta en donde no existe diferencia estadística al 0.05 de significancia es en la de número de frutos o ejotes por planta (NF) debido a que el p-valor de los tratamientos es de 0.0653 siendo un valor superior a 0.05.

En la prueba múltiple de medias Tukey se observa únicamente el grupo A por no existir diferencia significativa pero el valor superior pertenece al tratamiento 3 (salida del primer filtro) con una media de 16 frutos por planta y la media más baja el tratamiento 5 (agua potable) con una media de 5.8 frutos por planta.

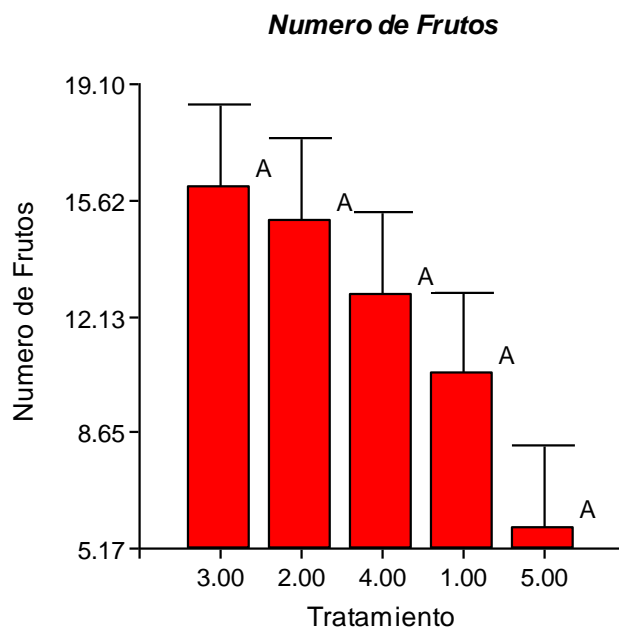


Figura 13. Comparación de medias de la variable número de frutos

En la figura anterior se puede ver que todos los tratamientos tienen la letra A, por lo que estadísticamente son iguales, aunque las medias superiores pertenecen a los tratamientos 3 y 2.

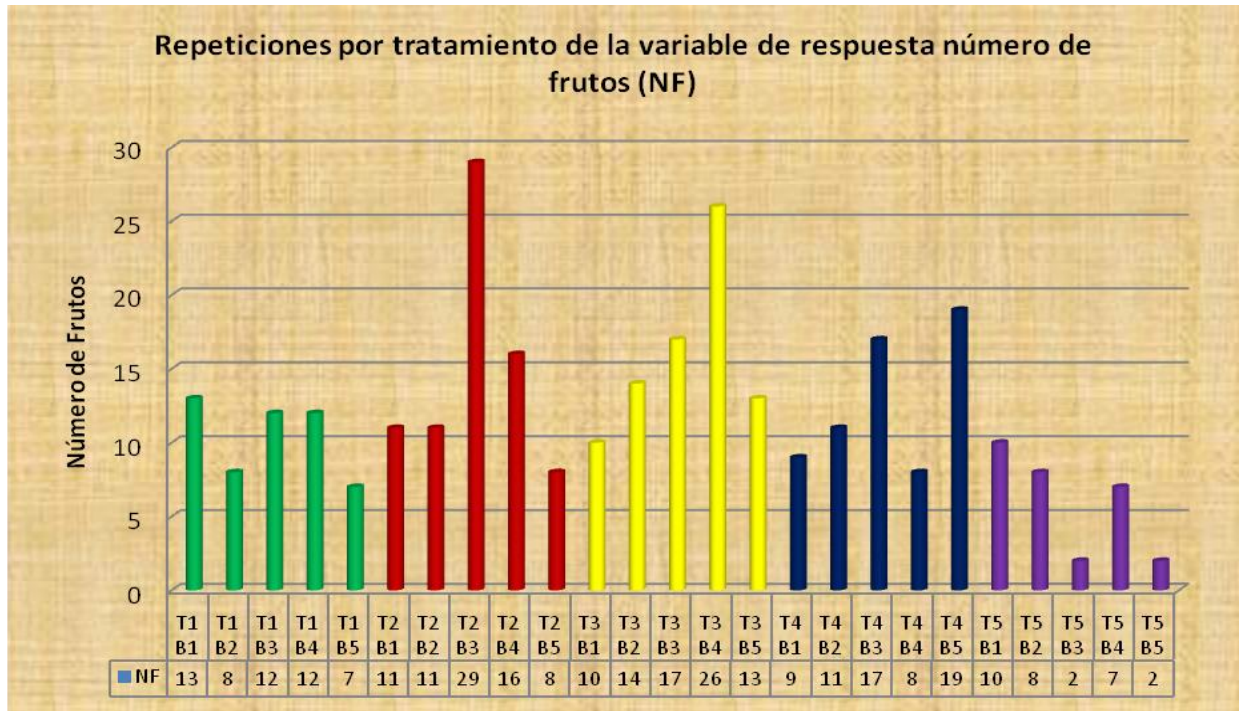


Figura 14. Repeticiones de los tratamientos de la variable de respuesta Número de Frutos (NF).

En el gráfico anterior se observa mayor variación en las repeticiones en cada tratamiento, generando un coeficiente de variación (CV) de 45.93% (ver cuadro 20). Como se dijo anteriormente, esta variación depende de la naturaleza del fenómeno que se esté investigando. Para ésta variable de respuesta (NF) no existió diferencia significativa por lo que estadísticamente los tratamientos son similares.

Cuadro 21. Comparación de los dos filtros percoladores

Filtro	Variables de respuesta					NF
	H (cm)	BFA (gr)	BFR (gr)	BSA (gr)	BSR (gr)	
Primer filtro percolador con lecho rocoso	17.34	65.25	2.49	16.89	0.78	16
Filtro percolador con ripio	15.54	43.37	2.89	13.4	0.87	12.8

Donde:

T: indica el número de tratamiento
B: indica el número de bloque (repeticiones)
H: altura de plantas
BFA: biomasa fresca aérea
BFR: biomasa fresca radicular
BSA: biomasa seca aérea
BSR: biomasa seca radicular
NF: número de frutos

Los datos presentados en el cuadro anterior son muy similares para todas las variables de respuesta, aunque en altura de plantas, biomasa fresca aérea y número de frutos las cuales son variables muy importantes, los datos superiores pertenecen al filtro percolador con lecho rocoso (T3). Si se cuentan con suficientes recursos financieros para su construcción se recomienda este tipo de tratamiento y si no, es suficiente con un filtro percolador con material más económico (lecho filtrante con ripio) o simplemente utilizar el agua después de un sedimentador primario.

Cuadro 22. Análisis químico del agua

TRATAMIENTO	pH	μS/cm C.E.	Meq/litro				ppm					RAS	CLASE		
			Ca	Mg	Na	K	N	P	Cu	Zn	Fe			Mn	B
ENTRADA SEDIMENTADOR (T1)	6.7	902	1.81	1.51	5.24	0.47	58.06	5.4	0	0	0	0	0.37	4.09	C3S1
SALIDA SEDIMENTADOR (T2)	6.8	852	1.8	1.29	5.02	0.4	46.15	4.91	0	0	0	0	0.31	4.05	C3S1
SALIDA PRIMER FILTRO (T3)	7.1	773	1.62	1.09	4.7	0.38	32.76	4.03	0	0	0	0	0.05	2.39	C3S1
SALIDA FILTRO EXPERIMENTAL (T4)	7.1	752	1.75	1.09	4.28	0.45	31.12	4.17	0	0	0	0	0.14	3.6	C3S1
AGUA POTABLE (T5)	7.4	366	1.4	1.07	1.07	0.09	0	0	0	0	0	0	0	0.96	C2S1

Fuente: Laboratorio Facultad de Agronomía, USAC.

Según clasificación FAO-UNESCO los tratamientos ingresados al laboratorio se clasifican como:

C2: Aguas de mediana salinidad

C3: Aguas de alta salinidad

S1: Aguas de baja sodicidad (bajo contenido de sodio)

Desde el punto de vista de rendimiento del cultivo, los puntos de muestreo salida del sedimentador, salida del primer filtro percolador y salida primer filtro percolador con ripio son muy similares, con una producción de biomasa y frutos aceptable. Esto se debe principalmente a las concentraciones de los elementos químicos en el agua. En donde se usó agua potable el rendimiento fue inferior debido a que no posee la cantidad de nutrientes necesarios para el crecimiento y desarrollo de la planta. La conductividad eléctrica disminuye en función del proceso de tratamiento del agua residual, valores altos de sales en solución disminuye la capacidad de la absorción de agua del cultivo por efecto osmótico. Los elementos Ca, Mg, Na, K, B, N y P disminuyen conforme avanza el proceso de tratamiento debido a que una parte son adsorbidos por el complejo coloidal y otra parte forman compuestos químicos y precipitan. El boro es un elemento fitotóxico, debiéndose tomar en cuenta la concentración del mismo en las aguas residuales.

En todos los puntos de muestreo existe una sodicidad baja y alta salinidad, excepto el agua potable, de acuerdo a la clasificación de la FAO-UNESCO.

Cuadro 23. Análisis físico y microbiológico del agua

TRATAMIENTO	mg/l SST	NMP/100 ml Coliformes totales	NMP/100 ml Coliformes fecales
ENTRADA SEDIMENTADOR (T1)	322	$> 1.6 \times 10^9$	$> 1.6 \times 10^9$
SALIDA SEDIMENTADOR (T2)	285	$> 1.6 \times 10^9$	$> 1.6 \times 10^9$
SALIDA PRIMER FILTRO (T3)	214	1.7×10^8	7.0×10^7
SALIDA FILTRO PERCOLADOR CON RIPIO (T4)	263	2.1×10^7	9×10^6
AGUA POTABLE (T5)	0	$< 2 \times 10^6$	$< 2 \times 10^6$

Fuente: elaboración propia.

Los sólidos en suspensión totales (SST) disminuyen en función del proceso de tratamiento, en la salida del sedimentador y en la salida de los dos filtros la cantidad de sólidos es inferior que en la entrada del sedimentador, éstos precipitan en el sedimentador.

La cantidad de coliformes totales y fecales es mayor a 1.6×10^9 tanto en la entrada como en la salida del sedimentador. En la salida del primer filtro disminuye drásticamente la cantidad de coliformes y en la salida del filtro percolador con ripio la cantidad de coliformes totales y fecales es de 2.1×10^7 y 9×10^6 respectivamente. Esto se debe a que en los filtros existe un aumento en la actividad microbiológica dándose un proceso de control biológico y además se da una adsorción de éstos microorganismos patógenos en el complejo coloidal.

11.CONCLUSIONES

1. Se acepta la hipótesis de trabajo planteada, el agua proveniente de al menos uno de los cuatro puntos de muestreo de la planta de tratamiento Aurora II cumplió con los parámetros físicos, químicos y biológicos para poderse reutilizar en el riego del cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*, L.) produciendo rendimientos aceptables en altura de las plantas, biomasa radicular, biomasa aérea y producción.
2. Se evaluaron las aguas residuales provenientes de la planta de tratamiento Aurora II con fines de riego del cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), variedad ICTA ligero. A las muestras de agua se les realizó un análisis físico, químico y microbiológico cuantificando sus efectos en el cultivo de frijol en donde se tomaron en cuenta las variables de respuesta, altura de plantas, biomasa fresca de la parte aérea, biomasa seca de la parte radicular, biomasa seca de la parte aérea, biomasa seca de la parte radicular y número de frutos.
3. En las variables de respuesta biomasa fresca de la parte aérea, biomasa fresca radicular, biomasa seca aérea, biomasa seca radicular y altura de plantas, a un nivel de significancia de 0.05 existe diferencia estadística, presentando los valores promedio superiores los tratamientos salida del sedimentador primario, salida del primer filtro y salida del filtro percolador con filtro. Las plantas regadas con agua potable presentaron los valores más bajos en todas las variables de respuesta. En la variable de respuesta número de frutos no existe diferencia significativa pero el valor superior lo presenta el tratamiento 3 (salida del primer filtro) con un valor promedio de 16 frutos por planta, seguido por el tratamiento 2 (salida sedimentador primario) con un valor promedio de 15 frutos por planta.

4. El punto de muestreo con la menor cantidad de coliformes totales y fecales sin tomar en cuenta el agua potable usada como testigo fue el tratamiento 4 (salida del filtro percolador con ripio), con un NMP/100 ml de 2.1×10^7 para coliformes totales y 9.0×10^6 para coliformes fecales. En la salida del primer filtro el número de coliformes totales y fecales NMP/100 ml fue de 1.7×10^8 y 7.0×10^7 respectivamente. El elemento fitotóxico que se encuentra en concentraciones altas en aguas residuales es el Boro (B) y el valor más bajo encontrado en los cuatro puntos de muestreo fue en la salida del primer filtro con un valor de 0.05 mg/l. En todos los puntos de muestreo según la clasificación de la FAO-UNESCO son aguas de baja salinidad pudiéndose utilizar con fines de riego pero hay que evitar el uso prolongado de éstas. Para el caso del Ca, Mg, K, N, y P hay que tomar en cuenta los requerimientos nutricionales de los cultivos para hacer un buen plan de nutrición vegetal.
5. Las aguas residuales provenientes de la colonia Aurora II son efectivas con fines de riego después de haber pasado por un tratamiento primario, produciendo un crecimiento y desarrollo adecuado de las plantas de frijol debido al contenido de nutrientes esenciales presentes en las aguas residuales. Hay que tomar en cuenta que no se hizo uso de fertilizantes.
6. Las aguas residuales se pueden utilizar con fines de riego del cultivo de frijol después de haber pasado por un sedimentador primario, teniendo la ventaja de utilizar menor cantidad de fertilizantes y por ende los costos de producción disminuyen, además se evita la contaminación de otros cuerpos de agua, eficientando el uso de dicho recurso. Con respecto al grupo coliforme no existe ninguna restricción para riego según el reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos

(236-2006) por tratarse de un cultivo tipo I (antes de su consumo lleva un proceso de industrialización o de cocción). No se realizó un análisis de DBO₅ y DQO porque según el reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos (236-2006) no aplica para el riego de cultivos.

12.RECOMENDACIONES

Se debe dar un tratamiento primario a las aguas residuales previo a ser utilizadas con fines de riego en el cultivo de frijol, de esta manera se evitan concentraciones altas de Boro, Sodio, sales y sólidos en suspensión. Los sólidos en suspensión pueden causar taponamiento de los sistemas de riego. Con el tratamiento primario (habiendo pasado el agua por un sedimentador primario y un filtro percolador) la RAS y la conductividad eléctrica se encuentran en un valor inferior a 3 y 0.75 dS/m respectivamente, presentando ningún peligro tanto para el suelo como para el cultivo.

No usar de forma prolongada las aguas residuales con fines de riego porque puede causar daño a la estructura del suelo y cambiar la química del complejo coloidal. Si se utilizan por bastante tiempo y dependiendo de la concentración de los elementos se deben aplicar tratamientos fisicoquímicos al suelo para eliminar el exceso de elementos dañinos.

No usar el agua residual únicamente con un tratamiento primario para regar cultivos agrícolas los cuales se consuman crudos debido a la alta concentración de coliformes totales y fecales, éstas pueden causar daños a la salud.

En el momento de aplicar el riego con aguas residuales usar equipo necesario de protección para evitar el contacto directo con patógenos y elementos dañinos a la salud.

Realizar una investigación donde se varíe la dosis de fertilizantes para encontrar un rendimiento óptimo en la producción.

13.BIBLIOGRAFÍA

1. Akiçca Bahri, V. (1997). Water Reuse for irrigation: agriculture, landscapes, and turf grass; CRC Press. Consultado 27 octubre 2010. Disponible <http://www.lenntech.es/aplicaciones/riego/calidad/irrigacion-calidad-agua.htm>
2. FAO. El uso seguro de las aguas residuales en la agricultura ofrece múltiples beneficios (en línea). Consultado 27 octubre 2010. Disponible en <http://www.ecodes.org/noticias/el-uso-seguro-de-las-aguas-residuales-en-la-agricultura-ofrece-multiples-beneficios>
3. Fernández, Enrique. Gestión de la recarga de acuíferos como practica alternativa de gestión hídrica (en línea). El proyecto DINA-MAR, Grupo Tragsa, Madrid, España. Consultado 10 marzo 2010. Disponible en [http://www.dina-mar.es/pdf/IF conama8-jt6-mar.pdf](http://www.dina-mar.es/pdf/IF_conama8-jt6-mar.pdf)
4. Fernández, Enrique. 2006. Técnicas de tratamiento de suelo y acuíferos (SAT) aplicadas a la gestión de la recarga artificial (en línea). Madrid, España. Consultado 10 marzo 2010. Disponible en <http://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=268276>
5. Fernández, Enrique. 2005. Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales, aspectos cualitativos y medioambientales, criterios técnicos derivados de la experiencia en la Cubeta de Santiuste (en línea). Madrid, España. Consultado 10 marzo 2010. Disponible en <http://www.revistaecosistemas.net/pdfs/143.pdf>

6. García, A. 2006. Estudio de la calidad de agua de tres efluentes provenientes de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales “Ing. Arturo Pazos Sosa” para su reutilización en el riego del cultivo de pepino *Cucumis sativus* L. Tesis Msc. Guatemala, USAC, ERIS, Facultad de Ingeniería.
7. López, Alex. 2010. Implementación del material denominado “ripio clasificado de concreto” como material filtrante en filtros percoladores en la planta piloto “Ing. Arturo Pazos Sosa”. Tesis Msc. Guatemala, USAC, ERIS, Facultad de Ingeniería.
8. Metcalf & Eddy, INC. (1995). Ingeniería de aguas residuales (en línea). Consultado 27 octubre 2010. Disponible en <http://www.miliarium.com/Paginas/Prontu/Tablas/Aguas/CaracterizacionAguasResidualesUrbanas.htm>
9. Ruano, René. 2005. Determinación del período apropiado de corte del pasto napier (*Penisetum purpureum*) después del riego por aspersión con agua residual sedimentada, en la planta de tratamiento Aurora II, para reducir la contaminación bacteriológica foliar y propiciar buenas características agronómicas. Tesis Msc. Guatemala, USAC, ERIS, Facultad de Ingeniería.
10. Saénz Forero, R. 2002. Introducción y uso de aguas residuales tratadas en agricultura y acuicultura (en línea). Salud y Ambiente OPS/ OMS. Consultado 10 noviembre 2010. Disponible en <http://www.cepis.org.pe/eswww/fulltext/repind53/rys/rys.html>

11. Solares, Marvin. 2006. Certificación de la norma ISO 14000 para una planta de tratamiento de aguas negras. Tesis de Ingeniería Industrial. Guatemala, USAC, ERIS, Facultad de Ingeniería.

12. Soledad, B. Contaminación del agua. Riesgo ecológico, económico y social (en línea). Consultado 10 noviembre 2010. Disponible en <http://www.mailxmail.com/curso-contaminacion-agua-riesgo-ecologico-economico-social/residuales-composicion-aguas>

13. Tebbutt, T. 1990. Fundamentos de control de la calidad del agua (en línea). Consultado 10 noviembre 2010. Disponible en <http://www.estrucplan.com.ar/producciones/entrega.asp?identrega=831>

14. Vickers, A. 1997. Handbook of Water Use and Conservation, Managing Water Resources for Crop Production. London, Royal Society. p.937-47.

ANEXOS

Cuadro 24. Distribución de las unidades experimentales en el campo

T4B1	T1B1	T5B1	T2B1	T3B1
T5B2	T2B2	T1B2	T3B2	T4B2
T1B3	T5B3	T2B3	T4B3	T3B3
T2B4	T1B4	T3B4	T5B4	T4B4
T5B5	T4B5	T2B5	T3B5	T1B5

Donde T se refiere al número de tratamiento y B al número de bloque. Los tratamientos se aleatorizarán dentro de cada bloque, en número de bloques es igual al número de repeticiones, siendo cada bloque una repetición.

Cuadro 25. Datos obtenidos en campo de las variables de respuesta

Trat-Bloque	Variable de respuesta					
	H	BFA	BFR	BSA	BSR	NF
T1B1	13.8	36.78	2.45	14.16	0.65	13
T1B2	13.4	28.57	1.72	11.32	0.57	8
T1B3	16.7	44.73	2.69	17.51	0.66	12
T1B4	16.8	40.37	2.28	13.91	0.67	12
T1B5	16.1	34.17	1.67	9.52	0.58	7
T2B1	14.9	42.92	2.14	14.47	0.46	11
T2B2	18.6	77.54	3.25	16.2	1.04	11
T2B3	20.8	139.96	4.02	26.88	1.26	29
T2B4	16.2	52.71	1.27	21.77	0.41	16
T2B5	15.3	51.45	2.83	18.24	0.93	8
T3B1	15.3	41.57	2.7	11.77	0.67	10
T3B2	16.9	50.37	2.16	10.28	0.76	14
T3B3	16.2	76.32	2.71	16.13	0.81	17
T3B4	23.2	114.15	3.69	30.83	1.14	26
T3B5	15.1	43.82	1.21	15.42	0.52	13
T4B1	13.1	47.23	3.37	10.42	0.97	9
T4B2	15.8	49.18	2.22	12.93	0.64	11
T4B3	18.4	48.68	3.01	11.06	0.94	17
T4B4	14.2	28.28	2.97	12.14	1.03	8
T4B5	16.2	43.47	2.86	20.46	0.78	19
T5B1	12.7	36.48	1.49	8.21	0.45	10
T5B2	11.5	32.71	1.77	9.61	0.39	8
T5B3	12.8	18.08	1.81	6.34	0.42	2
T5B4	11.9	18.71	1.63	8.27	0.49	7
T5B5	8.3	8.93	0.62	2.09	0.13	2

Donde:

- T: indica el número de tratamiento
- B: indica el número de bloque (repeticiones)
- H: altura de plantas
- BFA: biomasa fresca aérea
- BFR: biomasa fresca radicular
- BSA: biomasa seca aérea
- BSR: biomasa seca radicular
- NF: número de frutos