



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO  
EN INGENIERÍA**

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**BALANCE DE MACRONUTRIENTES EN EL SISTEMA  
AGUA, SUELO Y CULTIVO SOMETIDO A RIEGO**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**INGENIERÍA AMBIENTAL- AGUA**

**P R E S E N T A:**

**KAREN VELÁZQUEZ PEDROZA**

**TUTOR:**

**DRA. MARÍA TERESA ORTA L. DE VELÁSQUEZ**



2011



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dra. Frida María León Rodríguez

Secretario: Dra. Rosario Iturbe Argüelles

Vocal: Dra. María Teresa Orta Ledesma

1<sup>er</sup> Suplente: M.I. Ana Elisa Silva Martínez

2<sup>do</sup> Suplente: Dr. Ignacio Monje Ramírez

Lugar donde se realizó la tesis:

LABORATORIO DE BIOPROCESOS E INGENIERÍA AMBIENTAL INSTITUTO DE  
INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

---

Dra. MARÍA TERESA ORTA L. DE VELÁSQUEZ

# ***AGRADECIMIENTOS***

## **DIRECTORA DE TESIS**

Dra. María Teresa Orta Ledesma, le agradezco por la oportunidad de haberme permitido trabajar en el Instituto de Ingeniería y brindarme la asesoría en la maestría, el apoyo y la motivación de hacer las cosas bien y madurar en el ámbito profesional en cada etapa del proyecto y confiar en mí.

## **ASESOR E INTEGRANTE DE MI JURADO**

Dr. Ignacio Monje Ramírez, le agradezco por el apoyo, ánimo, paciencia, comentarios en todo el proceso de la elaboración de la tesis y sus atinadas correcciones mil gracias con todo cariño.

## **ASESORA**

M. en C. Isaura Yáñez Noguez, por el apoyo en el este transcurso de la maestría, sobre todo por la confianza y la amistad que me brindo en todo momento.

## **JURADO**

Dra. Frida María León Rodríguez, M.I. Ana Elisa Silva Martínez y Dra. Rosario Iturbe Argüelles, por los comentarios y asesoramiento que me brindaron para concluir con la maestría.

## **A MIS COMPAÑEROS DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA (UNAM)**

Alberto, Fabiola, Oscar, Miguel, Iván, Beatriz, Leonardo, Erick, Germán, Adriana y Reyna, por su gran apoyo en momentos difíciles y su compañerismo en todo momento gracias.

## **A MI COMPAÑERA Y AMIGA DE LA MAESTRÍA (UNAM)**

Sibila Concha Santos, por su apoyo, consejos, amistad y cariño haciendo más agradable la estancia en la maestría, gracias por tu amistad.

## **A MIS AMIGOS**

Erika, Jazmín, Rocio, Rosalinda, Alex, Mónica, Hiram, Arturo, Hugo, Armando, Anabel, Claudia, Sonia, Ricardo, Alvaro y Raymundo con quienes comparto momentos felices, difíciles y siempre tengo el apoyo de ellos, mil gracias por su amistad.

## **Conacyt**

Por el patrocinio económico en la estancia de la maestría.

## **UNIVERSIDAD DE CHAPINGO**

Por el servicio y asesoramiento en los análisis realizados en la experimentación.

# ***DEDICATORIAS***

## **A MIS PADRES**

### **Padre**

Porque desde pequeña ha sido para mí un gran hombre maravilloso al que siempre he admirado, gracias por todo el apoyo y el ejemplo que me has dado para seguir adelante, porque eres un guerrero ante obstáculos que se te han presentado en la vida, con amor, admiración y respeto.

### **Madre**

Porque es el ser más maravilloso de todo el mundo. Gracias por todo el apoyo moral, cariño y comprensión que me has brindado y por estar junto a mí en los momentos más difíciles, con amor, admiración y respeto.

## **A MIS PADRINOS**

Victor, Jorge, Mariela y Gladys

Por estar conmigo en cada momento, por todo su apoyo, cariño y consejos en este transcurso de mi vida. Gracias

## **A MIS SOBRINOS**

Aldo, Cindy Valeria, Diana Irazú, Jorge, Sharon, por sus travesuras y ternura que me inspiran para ser cada vez mejor

## **A MI MEJOR AMIGO**

Luciano Moreno Mateos

Por todo el cariño, amor y comprensión en todo momento , mil gracias por todo Luciano.

## **A UN AMIGO QUE JAMÁS VOY OLVIDAR QUE ESTA EN EL CIELO**

Raúl Ramírez Hermenegildo

Por la amistad y el apoyo que me brindó en las buenas y las malas y mil gracias por todos esos consejos en la maestría, siempre vas estar en mi corazón.

---

---

## CONTENIDO

### ÍNDICE DE TABLAS

### ÍNDICE DE FIGURAS

### NOMENCLATURA

### RESUMEN

### INTRODUCCIÓN

<b>CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES</b> .....	1
1.1 Tratamiento fisicoquímico avanzado mejorado con ozono (TPA-O <sub>3</sub> ) y su aplicación en aguas residuales para reúso el riego agrícola.....	1
1.2 Estudio de los macronutrientes en suelos irrigados con aguas residuales.....	3
<b>CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN</b> .....	6
<b>CAPÍTULO 3. OBJETIVOS</b> .....	8
3.1 Objetivo General.....	8
3.2 Objetivos Particulares.....	8
3.3 HIPÓTESIS.....	8
<b>CAPÍTULO 4. MARCO TEÓRICO</b> .....	9
4.1 Tratamiento Primario Avanzado mejorado con ozono (TPA-O <sub>3</sub> ).....	9
4.1.1 El ozono como ayuda del proceso de coagulación.....	9
4.2 Filtración.....	11
4.3 Desinfección del agua residual tratada mediante ozono.....	11
4.4 Definición de suelo y la importancia en el desarrollo de los cultivos.....	12
4.5 Principales macronutrientes en el suelo.....	13
4.5.1 Funciones específicas de los macronutrientes.....	13

---

---

---

4.5.2 Formas en las que se encuentran los macronutrientes en el suelo.....	15
4.6 Importancia de la materia orgánica en el suelo.....	17
4.7 Importancia del pH en el suelo.....	18
4.8 Balance de nutrientes en suelo.....	19
4.9 Características del cultivo de Lechuga.....	20
<b>CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA.....</b>	<b>23</b>
5.1 Descripción del arreglo experimental utilizado para el cultivo de la lechuga.....	24
5.1.1 Construcción de invernadero.....	24
5.1.2 Condiciones ambientales del invernadero.....	24
5.1.3 Cajones de madera utilizados como medio de contención del suelo.....	25
5.1.4 Sembrado de lechuga y disposición del cultivo en los cajones.....	26
5.1.5 Riego controlado.....	26
5.2 Tipos de aguas empleadas en las pruebas experimentales.....	27
5.2.1 Agua potable (control).....	27
5.2.2 Agua potable con nutrientes.....	27
5.2.3 Tratamientos de agua residual.....	28
5.2.3.1 Muestreo del agua residual cruda.....	28
5.2.3.2 Tratamiento primario avanzado mejorado con ozono (TPAO <sub>3</sub> ).....	28
5.2.3.3 Filtración.....	29
5.2.3.4 Desinfección.....	30
5.3 Cuantificación del contenido de macronutrientes en agua, suelo y cultivo.....	31
5.3.1 Procedimiento de muestreo, preservación y procesamiento de las muestras.....	31
5.4 Balance de macronutrientes en agua, suelo y cultivo.....	33

---

---

<b>CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>	<b>34</b>
6.1 Caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua residual cruda y tratada.....	34
6.2 Determinación de cationes y aniones en los diferentes tipos de agua.....	35
6.3 Caracterización del suelo antes de ser irrigado con los diferentes tipos de agua.....	36
6.4 Concentración de macronutrientes en suelo ( $\text{NH}_4^+$ , P disponible, $\text{K}^+$ , $\text{Ca}^{+2}$ , $\text{Mg}^{+2}$ , $\text{Na}^+$ y $\text{SO}_4^{-2}$ ) después ser irrigado con los diferentes tipos de agua.....	37
6.5 Determinación de pH, materia orgánica y conductividad eléctrica en suelo irrigado con los diferentes tipos de agua.....	44
6.6 Determinación de macronutrientes en el tejido vegetal de lechuga italiana ( <i>Lactuca sativa L</i> ).....	47
6.7 Peso y longitud de la lechuga italiana ( <i>Lactuca sativa L</i> ).....	48
6.8 Balance de macronutrientes en el sistema agua suelo y cultivo.....	49
<b>CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>54</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>55</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>60</b>
A1 Fotos del tratamiento de agua residual tratada.....	60
A2 Fotos del cultivo lechuga italiana ( <i>Lactuca sativa L</i> ) en el Invernadero.....	62
A3 Especificaciones de fertilidad de acuerdo la NOM-021-SEMARNAT-2000.....	72

---

---



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Plantas de tratamiento de aguas residuales con en el TPA en operación en México.....	2
Tabla 1.2 Concentración de macronutrientes en suelo antes y después de ser irrigados con agua residual cruda y agua residual tratada en diferentes países.....	4
Tabla 1.3 Contenido nutricional en tejido vegetal de la planta de café producida a partir del riego con agua residual tratada (adaptada de Herpin et al., 2007).....	5
Tabla 5.1 Propiedades del fertilizante comercial (Marca Ultrasol Multipropósito.....	27
Tabla 5.2 Condiciones de mezclado empleadas en el reactor de 70 L.....	28
Tabla 5.3 Parámetros y técnicas que se emplearon en el análisis de las muestras de agua, suelo y planta.....	32
Tabla 6.1 Características fisicoquímicas y microbiológicas en (A) Agua residual cruda, agua residual tratada, (B) TPAO <sub>3</sub> + Filtración + Desinfección (O <sub>3</sub> + NaOCl), (C) TPAO <sub>3</sub> + Filtración + Desinfección (NaOCl).....	34
Tabla 6.2 Concentración de cationes y aniones en los diferentes tipos de agua para la irrigación.....	35
Tabla 6.3 Caracterización del suelo.....	36
Tabla 6.4 Balance de macronutrientes en el sistema con agua potable.....	49
Tabla 6.5 Balance de macronutrientes en el sistema con agua potable con nutrientes.....	50
Tabla 6.6 Balance de macronutrientes en el sistema con TPAO <sub>3</sub> + F + (O <sub>3</sub> + NaOCl).....	51
Tabla 6.7 Balance de macronutrientes en el sistema con TPAO <sub>3</sub> + F + NaOCl.....	52
Tabla 6.8 Balance de macronutrientes en el sistema con agua residual cruda.....	53

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 5.1 Diagrama general de la metodología experimental..... 23

Figura 5.2 Vista del costado del invernadero..... 24

Figura 5.3 Descripción de los cajones para los surcos..... 25

Figura 5.4 Perforación y forrado de cajones..... 25

Figura 5.5 Asignación de cajones irrigados con los diferentes tipos de agua..... 26

Figura 5.6 Arreglo experimental del TPAO<sub>3</sub> ..... 29

Figura 5.7 Arreglo experimental de la desinfección con ozono y con hipoclorito de sodio... 30

Figura 6.1 Concentración de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en suelo irrigado con los diferentes tipos de agua..... 37

Figura 6.2 Concentración de P disponible en suelo irrigado con los diferentes tipos de agua..... 38

Figura 6.3 Concentración de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> en suelo irrigado con los diferentes tipos de agua..... 39

Figura 6.4. Concentración de K<sup>+</sup> intercambiable en suelo irrigado con los diferentes tipos de agua..... 40

Figura 6.5 Concentración de Ca<sup>+2</sup> intercambiable en suelo irrigado con los diferentes tipos de agua..... 41

Figura 6.6 Concentración de Mg<sup>+2</sup> intercambiable en suelo irrigado con los diferentes tipos de agua..... 42

Figura 6.7 Concentración de Na<sup>+1</sup> intercambiable en suelo irrigado con los diferentes tipos de agua..... 43

Figura 6.8 pH en suelo irrigado con los diferentes tipos de agua..... 44

Figura 6.9 Porcentaje de materia orgánica en suelo irrigado con los diferentes tipos de agua..... 45

Figura 6.10 Conductividad eléctrica en suelo irrigado con los diferentes tipos de agua..... 46

Figura 6.11 Contenido de macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg) en el tejido vegetal de lechuga irrigado con los diferentes tipos de agua..... 47

Figura 6.12 Peso de la lechuga irrigada con los diferentes tipos de agua..... 48

Figura 6.13 Longitud de la lechuga irrigada con los diferentes tipos de agua..... 48

## **NOMENCLATURA**

DBO<sub>5</sub>: Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (mg/L)

Ca: Calcio (mg/L) y (mg/Kg)

C.E: Conductividad Eléctrica (dS/m)

CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico (Cmol/Kg)

DQO: Demanda Química de Oxígeno (mg/L)

F: Filtración

K: Potasio (mg/L) y (mg/Kg)

Mg: Magnesio (mg/L) y (mg/Kg)

MO: Materia Orgánica (%)

N: Nitrógeno (mg/Kg)

Na: Sodio (mg/L) y (mg/Kg)

NH<sub>4</sub>: Amonio (mg/Kg)

NO<sub>2</sub>: Nitritos (mg/L) y (mg/Kg)

NO<sub>3</sub>: Nitratos (mg/L)

NOCl: Hipoclorito de sodio (mg/L)

NOM: Normas Oficiales Mexicanas

O<sub>3</sub>: Ozono (mg/L)

P: Fósforo (mg/Kg)

PO<sub>4</sub>: Fosfatos (mg/L)

SST: Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

SO<sub>4</sub>: Sulfatos (mg/L) y (mg/Kg)

TPA-O<sub>3</sub>: Tratamiento Primario Avanzado mejorado con Ozono

---

## RESUMEN

En este estudio se investigó el balance de macronutrientes en el sistema agua, suelo y cultivo, en suelo irrigado con agua residual municipal cruda, agua residual tratada, agua potable y agua potable complementada con nutrientes. Mediante el cultivo de lechuga Italiana (*Lactuca sativa L*) y empleando los diferentes tipos de agua, se evaluó experimentalmente la distribución de macronutrientes en el suelo y el tejido vegetal. Para desarrollar esta investigación se construyó un invernadero en donde se instalaron 10 cajones o módulos experimentales (dos por tipo de agua) en los cuales se trasplantaron y posteriormente cultivaron, 10 plántulas de lechuga Italiana por cajón. El monitoreo y control del cultivo se llevó a cabo durante un periodo de tiempo de 120 días.

La cuantificación de macronutrientes en el agua residual municipal cruda y tratada indica que el tratamiento fisicoquímico aplicado (TPA-O<sub>3</sub>, filtración en arena y desinfección con O<sub>3</sub> y NaOCl), es una tecnología que preserva los nutrientes (N, P, K, Ca y Mg) en el efluente tratado, lo cual tiene beneficios en la agricultura además de permitir el reúso seguro del agua residual tratada en el riego no restringido de cultivos. Con respecto al suelo utilizado en esta investigación para el cultivo de la lechuga, los resultados de caracterización lo clasifican como un suelo poco fértil bajo en el contenido P, Mg y Ca, pero con un alto porcentaje de materia orgánica, importante para la retención de humedad.

Durante el desarrollo del cultivo el comportamiento de los nutrientes en el suelo fue variable dependiendo del tipo de agua utilizado, de la concentración inicial presente y de los requerimientos del cultivo. Durante los primeros 40 días, el suelo registró un incremento en los niveles de P y K, lo cual fue más notorio en los casos donde se utilizó agua con nutrientes y el agua residual tratada; posteriormente y hacia el final de la prueba (80–120 días) la concentración de ambos nutrientes fue disminuyendo. El contenido de Ca y Mg se mantuvo cercano al nivel inicial del suelo hasta los 80 días de prueba para posteriormente incrementarse hacia el final del experimento.

El balance de masa global indica que con todos los tipos de agua que se emplearon para riego, los iones Ca y Mg tienden a acumularse en el suelo, no así el P, que registró una disminución por debajo del valor inicial del suelo. Al igual que el agua potable con nutrientes, el agua residual tratada proporciona nutrientes adicionales al suelo tales como el N y el contenido de materia orgánica, lo que representa una ventaja en el riego agrícola para el desarrollo de cultivos.

Finalmente, en esta investigación se encontró que al realizar un balance de masa en sistema agua, suelo y cultivo, la concentración de P fue deficiente en todos los tipos de aguas empleados así como en suelo utilizado para el cultivo de la lechuga, aspectos que deben ser considerados para mejorar la productividad del cultivo.

---

## INTRODUCCIÓN

En muchas partes del mundo, así como en México, las aguas residuales tienen un valor y en algunas ocasiones es el único recurso disponible para el riego de cultivos. A menudo son utilizadas sin la correcta aplicación de medidas de tratamiento lo que representa un grave riesgo para la salud por la contaminación microbiana inherente (Carrasco et al., 2006; Orta et al., 2008). Esta práctica ha sido ampliamente utilizada en México por más de un siglo (Jiménez, 1999), se estima que del orden de  $108 \text{ m}^3/\text{s}$  de aguas residuales se utilizan en la irrigación de 254,000 ha de suelo (Chávez et al., 2004).

Sin duda las aguas residuales son una alternativa en zonas donde hay escasez del vital líquido, no sólo por ser una fuente de agua para los cultivos, sino por el aporte de macronutrientes y las concentraciones elevadas de materia orgánica que mejoran la fertilidad del suelo (Simonete et al., 2003). No obstante, su uso sin un tratamiento previo puede ocasionar problemas debido al alto contenido de sales, metales pesados y la presencia de microorganismos patógenos.

Los avances tecnológicos en el tratamiento de aguas residuales para reúso seguro en la agricultura no han sido del todo satisfactorios, porque se carece de métodos de desinfección efectivos que sean técnica y económicamente viables para esta aplicación. Recientemente se han reportado alternativas que incluyen la combinación de métodos convencionales como el tratamiento primario avanzado (TPA: coagulación-floculación) y tecnologías avanzadas como el ozono el cual confiere mayor eficiencia al tratamiento, pues mejora la velocidad de sedimentación de flóculos, disminuye la generación de lodos y ayuda a la remoción de color y turbiedad (Campos Reales et al., 2008), además de que es un desinfectante efectivo contra virus y protozoarios (Legrini et al., 1993).

El TPA es una buena opción cuando las aguas residuales tratadas se reúsan en la agricultura debido a que se conservan en gran medida los nutrientes (nitrógeno y fósforo) y la materia orgánica que son benéficos para los cultivos (Jiménez et al., 1999). Sin embargo, el efluente clarificado que resulta de este tratamiento debe ser sometido a una etapa de filtración y posterior desinfección, para que el agua tratada pueda ser reutilizada en el riego de cultivos no restringido (NOM-001-SEMARNAT-1996).

Aunado a los beneficios que puede aportar un agua residual tratada en la agricultura, un aspecto relevante que debe ser evaluado, es el control y el balance de macronutrientes y elementos químicos adicionales transferidos a los suelos irrigados y sus repercusiones tanto en la fertilidad de estos últimos como en el desarrollo de los cultivos. Los macronutrientes son fundamentales en el crecimiento de los cultivos, ya que las plantas requieren grandes cantidades para desarrollar su ciclo de vida (Seoáñez, 1999). El contenido de nutrientes en el agua residual tratada puede contribuir al crecimiento de los

---

cultivos, pero se debe evaluar y dar un seguimiento periódico al contenido nutrimental de plantas y suelo, para evitar un desequilibrio de nutrientes (Pedrero et al., 2010).

La presente tesis tiene el propósito de contribuir a las investigaciones realizadas en torno al balance de macronutrientes en el sistema agua, suelo y cultivo de lechuga, empleando agua residual tratada mediante un tren de tratamiento fisicoquímico que incluye el TPA mejorado con ozono, la filtración en arena y la desinfección con ozono y cloro respectivamente. Así mismo se hace una comparación con agua de la red de suministro suplementada con nutrientes para cultivo. El balance de macronutrientes en dicho sistema considera la cuantificación de los siguientes elementos nutricionales: nitrógeno (como  $\text{NH}_4$  y N total), fósforo (P total y  $\text{PO}_4$ ), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre ( $\text{SO}_4$ ), respectivamente, en los diferentes tipos de agua utilizados para el riego, el suelo y el cultivo de la lechuga.

La tesis se divide en siete capítulos, en el primero se presenta una revisión bibliográfica de las investigaciones realizadas en torno al tratamiento primario avanzado mejorado con ozono (TPA- $\text{O}_3$ ) y sobre estudios de nutrientes en suelo y balance de nutrientes en cultivos en los cuales se usa el agua residual tratada. El segundo capítulo está enfocado a la importancia al tema del balance de nutrientes y la relación con el tren de tratamiento de agua residual que se empleó. En el tercer capítulo se describe el objetivo general y objetivos particulares del trabajo. En el cuarto capítulo se explican los fundamentos teóricos, las etapas que se integran el tren de tratamiento utilizado (TPA- $\text{O}_3$ , filtración en arena y desinfección con  $\text{O}_3$  y NaOCl respectivamente en forma general y temas más específicos sobre los macronutrientes en suelo y su importancia del balance de macronutrientes en el sistema agua, suelo y cultivo. La metodología llevada a cabo se describe en el quinto capítulo, mientras que los resultados obtenidos y la discusión de éstos se presentan en el sexto capítulo. Finalmente se resumen las conclusiones más importantes encontradas en esta investigación en el séptimo capítulo.

---

---

## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

### 1.1 Tratamiento fisicoquímico avanzado mejorado con ozono (TPA-O<sub>3</sub>) y su aplicación en aguas residuales para reúso en el riego agrícola.

Como se mencionó en la introducción, las aguas residuales son a veces el único recurso disponible para el riego en algunas zonas agrícolas del País, pero su uso presenta riesgos para la salud, debido al contenido de microorganismos patógenos, huevos de helmintos (HH) y sustancias que pueden ser tóxicas al hombre a las plantas y salinizar o sodificar suelos.

Con el TPA convencional (coagulación-floculación-sedimentación) se puede remover HH a valores que fluctúan entre 0.8 y 5 HH/L obteniéndose un efluente con calidad para reúso en riego restringido (NOM-001-SEMARNAT- 1996). Cuando se aplica una etapa posterior de filtración (filtración en arena), se puede reducir en número de HH a <1 HH/L (riego no restringido), sin embargo, para alcanzar los estándares de calidad en cuanto a contenido de Coliformes fecales (<1000 NMP/100 mL), es necesaria la aplicación de una etapa final de desinfección (Jiménez et al., 2002). Aplicando el TPA seguido de filtración y desinfección con cloro, se pueden obtener un efluente adecuado para el riego agrícola sin restricciones, con el beneficio adicional que implica el aporte de materia orgánica, nitrógeno y fósforo (169 Kg N/ha/año y 32.3 Kg P/ha/año; Jiménez et al., 1999).

El TPA es aplicado con éxito en países como Noruega, Suecia, Francia, España y USA (Keime, 2002), estudios recientes lo ubican como un tratamiento que mejora la calidad del agua tratada y lo recomiendan para su reutilización en el riego de cultivos agrícolas (Kalavrouziotis et al., 2008). En México se tienen plantas de aguas residuales que operan bajo el principio de dicho de tratamiento, en los estados de Baja California Norte, D.F, Campeche, Chihuahua, Guerrero, Puebla y Sinaloa como se indica en la tabla 1.1. Se puede observar que en algunos casos el destino final del agua residual tratada es el riego agrícola, aunque se desconoce si ésta es sometida a una etapa de desinfección y si cumple con los requisitos correspondientes de norma, en cuanto a la calidad microbiológica se refiere.

Cuando se emplea ozono en la desinfección de efluentes de TPA, éste presenta ventajas comparado con otros desinfectantes como el ácido peracético y la UV cuando se tiene presencia de virus (Gehr et al., 2003), entre otros contaminantes como la *amoeba* que son difíciles remover. Recientemente se han publicado estudios en donde se evalúa la combinación de métodos como el tratamiento primario avanzado mejorado con ozono (TPA-O<sub>3</sub>) seguido de la desinfección con ozono e hipoclorito de sodio respectivamente, con el fin de obtener efluentes para reúso en el riego agrícola y su aplicación en cultivos específicos de vegetales (Campos Reales et al., 2008).

**Tabla 1.1. Plantas de tratamiento de aguas residuales con en el TPA en operación en México.**

Localización	Nombre de la Planta, inicio de operación	Capacidad Instalada (L/s)	Caudal Tratado (L/s)	Destino de la descarga o uso
Baja California Tijuana	Binacional o Pitar	1,100	1,078	Océano Pacífico
Campeche Campeche	La Noria del Mar	10	3	Acuífero
Campeche Campeche	Siglo XXI	20	6	Acuífero
Chihuahua Cd. Juárez	Norte, 2000	2,500	2,500	Río Bravo, <b>riego agrícola</b>
	Sur, 2000	1,000	1,000	Río Bravo, <b>riego agrícola</b>
D.F Tláhuac	San Andrés Mixquic	30	30	Riego de hortalizas
Guanajuato	Termoeléctrica CFE Victoria	160	160	Río Lerma
	Victoria	5	5	
Guerrero-Acapulco de Juárez	Aguas blancas	1,350	1,350	Playa olvidada
Jalisco	Tlajomulco de Zúñiga	5	5	Río Corona y Río Santiago
Puebla	Alseseca Sur, 2001	700	500	Río Alseseca
	Atoyac Sur, 2001	400	200	<b>Riego Agrícola</b>
	Barranca del Conde, 2001	340	180	Río Atoyac
				<b>Riego Agrícola</b>
San Luis Potosí	San Francisco, 2001	1,100	1,100	
	Tanque Tenorio	1,050	1,000	<b>Riego Agrícola</b> /uso integral
Sinaloa	Culiacán Norte, 2001	1,700	1,310	Dren Cedritos
Mazatlán	El Crestón	820	920	Golfo de California.
	(Rehabilitada-ampliada entre 1997-2001)			Emisor submarino para aguas tratadas.
<b>Total</b>	17 plantas	12,290	11,347	

Fuente: Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y tratamiento de aguas residuales en operación, (CONAGUA, 2009)

El uso de ozono como ayuda de la coagulación (TPA-O<sub>3</sub>), aumenta el rendimiento del tratamiento, disminuye la turbidez y el color, mientras que reduce el volumen de lodos producidos y aumenta la velocidad de sedimentación, debido a los mayores flóculos formados (Campos Reales, et al., 2008). Adicionalmente el uso de ozono con dosis bajas de cloro, ayuda a reducir la formación de subproductos como trihalometanos que cuando se utiliza cloro como desinfectante, que pueden ser perjudiciales para los cultivos de la agricultura.



Campos Reales (2008), comparó la longitud de las plántulas y el porcentaje de germinación de semillas de lechuga (*Lactuca sariva L*) irrigadas con aguas residuales tratadas mediante la combinación de métodos antes mencionada. Encontró que las plántulas irrigadas con aguas desinfectadas con ozono presentaban un crecimiento ligeramente menor de 25mm de longitud aunque mostraban mayor porcentaje de germinación de 86% que las semillas irrigadas con agua de la red suplementada con fertilizantes de 30mm de longitud y 84% de germinación. Adicionalmente observó que las semillas irrigadas con agua desinfectada con cloro, presentaron el efecto contrario, es decir un mayor crecimiento de plántulas de 30mm de longitud pero bajos porcentajes de germinación del 70%.

Un aspecto que resta por evaluar de este método de tratamiento y su aplicación en la producción de agua residual tratada para la agricultura, es lo relativo al seguimiento de los nutrientes que esta aporta así como su comportamiento en los suelos irrigados y el aprovechamiento por los cultivos; de ahí la importancia de la presente tesis.

## 1.2 Estudio de macronutrientes en suelos irrigados con aguas residuales

Los denominados macronutrientes (N, P, K, Ca, Na, Mg y S) son elementos que las plantas requieren en cantidades considerables para la síntesis de la clorofila, hidrólisis de azúcares, producción de aminoácidos y la formación de proteínas (Isea, 2004). Si bien las aguas residuales son una alternativa para el riego agrícola, por la escasez del recurso en zonas agrícolas y por el aporte de macronutrientes, el uso no controlado puede llegar a afectar la fertilidad de los suelos irrigados debido su contenido elevado de sales entre otras afectaciones.

Trabajos publicados en la literatura han demostrado que las aguas residuales pueden incrementar la salinidad, alterar la concentración de cationes intercambiables y ocasionar cambios en el pH y en las propiedades del suelo (Adrover et al., 2010, Kiziloglu et al., 2008). Es por ello que las aguas no tratadas pueden utilizarse por periodos de tiempo cortos, mientras que las tratadas se pueden utilizar a más largo plazo (Kiziloglu et al., 2008). Otro aspecto que se debe valorar, es el hecho de que los suelos sometidos a riego con aguas residuales tratadas, ofrecen una mayor movilidad de elementos, provocando que algunos que pueden ser nocivos para las plantas o al ser humano, puedan lixiviar y otros acumularse (como los nutrientes) tanto en solución como en forma asimilable para las plantas (Isea et al., 2004).

De los estudios relacionados con el control y balance nutricional, en la mayoría de los casos se da seguimiento al contenido de nutrientes (N, P, Na, K, Ca, Mg) en el suelo irrigado con distintos tipos de efluentes tratados como se muestra en la tabla 1.2.

**Tabla 1.2 Concentración de macronutrientes en suelo antes y después de ser irrigados con agua residual cruda y agua residual tratada en diferentes países**

País	Macronutrientes (mg/kg)		Tratamiento de agua residual
	Inicial	Final	
<b>Turquía</b> (Kiziloglu, 2008)	N (%) : 0.11	N (%) : 0.081	Efluente primario
	P : 18.00	P : 15.42	
	Na : 46.00	Na : 59.80	
	K : 975.00	K : 2090.40	
	Ca : 4260.00	Ca : 3680.00	
	Mg : 720.00	Mg : 115.20	
<b>Grecia</b> (Kalavrouziotis, 2008)	P : 18.86	P : 41.16	Efluente secundario (sugieren T P A)
	Mg : 32.40	Mg : 54.00	
	Ca : 252.00	Ca : 208.00	
	K : 121.70	K : 118.00	
<b>Irán</b> (Heidarpour, 2007)	N (%) : 0.07	N (%) : 0.08	Sin tratamiento Agua residual cruda
	P : 11.70	P : 29.40	
	Na : 178.70	Na : 262.30	
	K : 488.50	K : 504.70	
	Ca : 108.60	Ca : 78.70	
	Mg : 25.40	Mg : 46.90	
<b>Brasil</b> (Herpin, 2007)	Ca : 200.00	Ca : 236.00	Efluente secundario Facultativo
	Mg : 120.00	Mg : 86.40	
	K : 15.60	K : 97.50	
	Na : 6.90	Na : 75.90	
	P : 3.00	P : 32.20	
<b>Venezuela</b> (Isea, 2004)	Mg : 9.62	Mg : 15.38	Efluente de lagunas de estabilización
	Ca : 76.00	Ca : 430.00	
	K : 98.40	K : 132.00	
	Na : 36.89	Na : 392.00	

Se puede observar que hay macronutrientes que tienen un comportamiento variable, esto es, se puede acumular en el suelo o puede disminuir su concentración con respecto a su estado inicial, dependiendo del tipo de agua utilizada en el riego y seguramente en función del tipo de cultivo; es el caso del N, Ca, P, K y el Mg, aunque la mayoría de los nutrientes tienden a acumularse, el Na es un elemento que sigue este comportamiento lo cual puede llegar a afectar la fertilidad del suelo. Elementos como el K, Ca y Mg destacan por su elevado contenido inicial y por los niveles de acumulación que alcanzan.

De acuerdo con Herpin et al., (2007) en un estudio realizado en Brasil, al utilizar un efluente de tratamiento biológico en el riego del cultivo de café, identificaron que se pueden presentar tres inconvenientes: 1) el aumento de sodicidad del suelo; 2) la

disminución del contenido de materia orgánica, acompañado de un disminución de la capacidad de intercambio catiónico; y 3) un desequilibrio en el balance de nutrientes en el sistema suelo-planta. Desde el punto de vista nutricional, encontraron que los niveles de N, P y S en el suelo no fueron suficientes o adecuados para el crecimiento del cultivo del café. Estos mismos autores, evaluaron el contenido nutricional en el tejido vegetal de la planta de café producida a partir del riego con un efluente de tratamiento secundario y lo comparan con los intervalos reportados para este cultivo vegetal (tabla 1.3). Con excepción del Ca, cuyo contenido se encuentra por arriba de los valores reportados para esta planta (Willson, 1985; Malavolta et al., 1997 y Matiello, 1997; citados por Herpin et al., 2007) en contenido nutricional de los demás elementos se encuentran dentro de los valores normales del tejido vegetal.

Tabla 1.3 **Contenido nutricional en tejido vegetal de la planta de café producida a partir del riego con agua residual tratada (adaptada de Herpin et al., 2007)**

Elemento (g/Kg)	Año			Cita		
	2003	2004	2005	A	B	C
N	25.8	31.2	26.1	26.0-34.0	29.0-32.0	30.0-35.0
<b>Ca</b>	<b>11.6</b>	<b>16.3</b>	<b>16.1</b>	<b>7.5-15.0</b>	<b>13.0-15.0</b>	<b>10.0-15.0</b>
P	1.6	1.7	1.2	1.5-2.0	1.6-1.9	1.2-2.0
K	21.0	22.4	26.7	21.0-25.0	22.0-25.0	18.0-25.0
Mg	2.9	3.2	3.8	2.5-4.0	4.0-4.5	3.5-5.0
S	1.8	1.9	1.6	1.5-2.5	1.5-2.0	1.5-2.0
Na	0.8	2.2	2.4	-	-	-

(A): Willson, 1985; (B) Malavolta et al., 1997; (C) Matiello, 1997. Todos ellos citados por Herpin et al., 2007.

Otros autores han publicado estudios sobre el contenido de nutrientes en tejido vegetal de diferentes cultivos. **Kalavrouziotis (2008)** encuentra que al utilizar un efluente secundario para el riego de cultivos de brócoli y coles de Bruselas, el suelo experimenta un incremento significativo en la concentración de P, Zn, Cd y de pH. En las plantas secas de los cultivos, disminuye por una lado el contenido de P y Zn (brócoli) y aumenta Cd y Co (coles de Bruselas); en ambos casos se incrementa el contenido de Ni. En el caso particular de las coles de Bruselas se registró un incremento en Pb.

Por su parte **Kiziloglu (2008)**, encuentra una relación entre en contenido de nutrientes en el tejido vegetal de dos tipos de cultivo, coliflor y calabaza, y el tipo de agua utilizada para el riego. El contenido de macronutrientes (P, K, Ca, Mg y Na) de ambas plantas disminuye en función del tipo y calidad del agua utilizada, en el orden siguiente: agua residual cruda > tratamiento preliminar > tratamiento primario > agua potable.

## CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN

La creciente escasez de recursos hídricos por el consumo excesivo y por las sequías, y la generación de gastos elevados por el manejo de las aguas residuales, hace necesaria su reutilización. En México las aguas residuales que se transportan a lo largo del gran canal del desagüe, originadas en la ciudad, se aprovechan para riego agrícola, en Chalco y Chiconautla (Estado de México) el Valle de Mezquital y Tulancingo, (Hidalgo). Otros lugares donde se utilizan aguas residuales son Valsequillo, Puebla y Ciudad Juárez Chihuahua (Orta, 2006).

Sin duda las aguas residuales son empleadas para el riego agrícola, por la escasez del recurso en zonas agrícolas y por el aporte de macronutrientes, el uso no controlado puede llegar a afectar la fertilidad de los suelos irrigados debido a su contenido de sales entre otras afectaciones.

El agua residual tratada puede ser una alternativa viable, sin duda puede aportar beneficios a la agricultura, por el aporte de macronutrientes y materia orgánica que mejora la fertilidad del suelo. Sin embargo el balance de macronutrientes es un punto importante para la fertilidad del suelo y el desarrollo de los cultivos.

Para lograr la óptima nutrición de las plantas se necesita un equilibrio de nutrientes. Por ejemplo, un exceso de magnesio en el suelo podría inhibir la absorción de potasio por las plantas. Una aplicación excesiva de fósforo podría inducir una deficiencia de zinc en suelos con una concentración limitada o baja en zinc. El exceso de hierro podría inducir una deficiencia de manganeso. Mantener un balance de nutrientes es un objetivo importante de manejo desde los puntos de vista agronómico, económico y ambiental. El propósito de aplicar nutrientes es complementar la capacidad de los suelos para suministrar los nutrientes adecuados a los cultivos en crecimiento (Guzmán, 2004).

En la literatura no se ha reportado algún estudio sobre el balance de macronutrientes en el sistema agua-suelo-planta empleando agua residual tratada, por eso es de suma importancia este estudio realizado.

El objetivo de este trabajo de investigación fue realizar un balance de macronutrientes en el sistema agua, suelo y cultivo de lechuga, empleando agua residual tratada mediante un tren de tratamiento físico-químico que incluye el TPA mejorado con ozono, la filtración en arena y la desinfección con ozono y cloro respectivamente. Así mismo se hace una comparación con agua de la red de suministro suplementada con nutrientes para cultivo. El balance de macronutrientes en dicho sistema considera la cuantificación de los siguientes elementos nutricionales: nitrógeno (como  $\text{NH}_4$  y N total), fósforo (P total y

PO<sub>4</sub>), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (SO<sub>4</sub>), respectivamente, en los diferentes tipos de agua utilizados para el riego, el suelo y el cultivo de la lechuga.

## CAPÍTULO 3. OBJETIVOS

### 3.1 Objetivo General:

Realizar el balance de macronutrientes en un sistema, agua-suelo-cultivo sometido a riego con cinco tipos de agua de riego a nivel invernadero en un ciclo agrícola utilizando como cultivo a la lechuga (*Lactuca sativa L.*)

### 3.2 Objetivos Particulares:

1. Cuantificar el contenido de macronutrientes ( $\text{NH}_4^{+1}$ , P disponible,  $\text{K}^{+1}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^{+1}$  y  $\text{SO}_4^{-2}$ ) y materia orgánica en suelo.
2. Cuantificar el contenido de macronutrientes en:
  - Agua residual municipal cruda
  - Agua residual tratada mediante los procesos:
    - ❖ TPA+O<sub>3</sub> – Filtración – Desinfección (O<sub>3</sub> + NaOCl)
    - ❖ TPA+O<sub>3</sub> – Filtración – Desinfección (NaOCl)
  - Agua potable
  - Agua potable con nutrientes
3. Determinar el balance de masa en el sistema agua-suelo y cultivo para valorar el aporte de macronutrientes, en suelo irrigado con agua residual tratada y comparar el desarrollo del cultivo con los cinco tipos de agua de riego.
4. Evaluar el efecto de los diferentes tipos de agua de riego y el contenido de macronutrientes en suelo y el desarrollo del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*).

### 3.3 HIPÓTESIS

Se espera que el agua residual tratada proporcione los macronutrientes necesarios al suelo para obtener un mejor crecimiento en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*).

## CAPÍTULO 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 Tratamiento Primario Avanzado mejorado con ozono (TPA-O<sub>3</sub>)

El Tratamiento Primario Avanzado convencional ó coagulación-floculación, consiste fundamentalmente en la desestabilización y posterior eliminación de partículas coloidales del agua, tanto de carácter orgánico (virus, bacterias, algas, etc.) como inorgánico (óxidos metálicos, arcillas, etc.). Para la eliminación de materia orgánica natural del agua por coagulación-floculación se emplean como coagulante sales de aluminio (III) en un proceso que aunque también se suele emplear sales de hierro (III); incluye reacciones de hidrólisis, precipitación y adsorción. En algunos casos se añaden pequeñas cantidades de floculante (polímero aniónico de alto peso molecular y alta densidad de carga). Este proceso remueve entre 80 y 85% de sólidos suspendidos (SST), 50% a 55% de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) (Jiménez, 2001).

El tratamiento primario avanzado se emplea en países nórdicos, principalmente en los países de la Península Escandinava y existen buenas experiencias del mismo en países como Francia, Canadá, Estados Unidos y España. Se aplica cuando los requerimientos del efluente son menores al tradicional 30/30 (DBO/SST) definido para efluentes secundarios, cuando el agua tratada se desea emplear para riego y es necesario mantener su propiedad de aportar al suelo nitrógeno, fósforo y materia orgánica. El tratamiento primario avanzado tiene la ventaja de mantener una eficiencia constante con efluentes de alta variabilidad, en cantidad y calidad, este beneficio no lo tienen los procesos biológicos. Entre otras ventajas, el tratamiento primario avanzado es capaz de eliminar metales pesados tales como Pb, Zn y Cu con eficiencia del orden del 70%. Es un proceso muy compacto, tiene tiempo total de tratamiento (coagulación, floculación y sedimentación) de 15 a 45 minutos (Jiménez, 2001).

#### 4.1.1 El ozono como ayuda del proceso de coagulación

El ozono es una forma alotrópica del oxígeno formada por tres átomos de este elemento, cuya función más conocida es la de protección frente a la peligrosa radiación ultravioleta del sol; pero también es un potente oxidante con gran variedad de aplicaciones, la más destacada es la desinfección de aguas. Es después del flúor el compuesto más oxidante debido a su facilidad para aceptar electrones. De rápida descomposición y a igualdad de condiciones, más estable en agua que en aire. Se trata de un gas azul pálido e inestable, que a temperatura ambiente se caracteriza por un olor picante, perceptible a menudo durante las tormentas eléctricas, así como en la proximidad de equipos eléctricos, según evidenció el filósofo holandés Van Marun en el año 1785. A una temperatura de  $-112^{\circ}\text{C}$  condensa a un líquido azul intenso. En condiciones normales de presión y temperatura, el ozono es

trece veces más soluble en agua que el oxígeno, pero debido a la mayor concentración de oxígeno en aire, éste último se encuentra disuelto en el agua en mayor medida que el ozono (Pérez, 2006). Gracias a su alto potencial redox, además de proporcionar una eficaz desinfección y reducir la  $DBO_5$ , es capaz de eliminar compuestos como cianuros y fenoles, precipitar el hierro y el manganeso, mejorar los caracteres organolépticos del agua (olor, aspecto y sabor) y favorecer la nitrificación (oxida los nitritos, compuestos tóxicos para la fauna acuática, a nitratos). En el caso de pretender utilizarse un agua residual terciaria, por ejemplo, para la recarga de lagos, el tratamiento primario avanzado con ozono elimina los problemas de olores desagradables o eutrofización, además de garantizar la ausencia de microorganismos indeseables y potencialmente nocivos para la salud humana (*Legionella*) (Rice, 2002).

En la literatura se describen numerosos casos de la influencia positiva de la preozonación sobre la eliminación de partículas coloidales mediante coagulación. Los factores más influyentes en el efecto de la preozonación sobre la coagulación son: la composición del agua cruda, la dosis de ozono aplicada y la dosis de coagulante empleada (Valdés, 2011).

Debido a la composición tan compleja del agua residual, es difícil elucidar los mecanismos involucrados en el proceso. Los principales mecanismos propuestos por los que el ozono puede influir en el proceso de coagulación son (Rodríguez, 2003):

- *Incremento de la asociación del coagulante con la materia orgánica ozonada*
- *Aumento de la complejación del calcio con la materia orgánica ozonada*
- *Transformación de materia orgánica de la superficie de las partículas coloidales*
- *Polimerización de la materia orgánica*
- *Reacción con productos liberados por algas*

En un estudio reportado por Orta (1998) determinó que el ozono es más efectivo cuando se aplica justo después de la adición del coagulante. Los efectos positivos del proceso son la disminución de la dosis del coagulante y una mejor remoción de sólidos y otros parámetros fisicoquímicos como turbiedad y color; una menor cantidad de lodos producidos debido a la disminución de la dosis de coagulante; una mayor velocidad de sedimentación; un vida útil y más larga de los filtros, y una disminución de desinfectante cloro (Orta et al., 1998).

Campos Reales (2008) confirmó que la aplicación del ozono durante la coagulación mejora aún más el rendimiento del TPA que la pre-ozonación, logrando una remoción de color y turbiedad, mientras que se reduce el volumen de lodos producidos y se aumenta



considerablemente la velocidad de sedimentación de los flóculos debido a que su densidad es mayor. Existe una dosis óptima en la mejora del ozono durante el TPA muestra una mayor remoción de SST y turbiedad, y en consecuencia, la dosis de coagulante puede ser reducida (Campos Reales et al., 2008).

#### 4.2 Filtración

Es un proceso físico que separa los sólidos suspendidos y la materia coloidal de la fase líquida por medio de un material poroso. La filtración en arena se utiliza con frecuencia como método para separar los sólidos suspendidos del agua. La filtración en arena usualmente consiste en una capa múltiple de arena con una variedad de tamaño y gravedad específica. Los filtros de arena se pueden proveer en diversos tamaños y ambos pueden ser manejados manualmente o de forma totalmente automática. Remueve partículas y materia coloidal no sedimentable después de la floculación biológica o química, o de ambas. Incrementa la remoción de sólidos suspendidos, turbiedad, DBO<sub>5</sub>, DQO, metales pesados, bacterias asociadas a partículas, huevos de helmintos, y otras sustancias. Mejora la eficiencia y reduce el costo de desinfección a través de la remoción de materia orgánica suspendida y otras sustancias interferentes. Asegura la operación continua de la planta y calidad constante del efluente (Metcalf y Eddy, 1996).

#### 4.3 Desinfección del agua residual tratada mediante ozono

El ozono es efectivo en la destrucción de bacterias, virus y patógenos pero también en la de parásitos protozoarios formadores de quistes como Giardia y Cryptosporidium que son particularmente resistentes a la mayoría de los desinfectantes (Perrine, 1990). Los mecanismos de desinfección asociados con el uso del ozono incluyen (U.S.EPA, 1999):

- La oxidación o destrucción directa de la pared de la célula con la salida de componentes celulares.
- Las reacciones con los subproductos radicales de la descomposición del ozono.
- El daño a los componentes de los ácidos nucleicos (purinas y piridinas).
- La ruptura de las uniones de carbono-nitrógeno que conduce a la despolimerización.

La desinfección de agua residual tratada con ozono presenta algunas ventajas con relación al uso del cloro (riesgo de formación de compuestos organohalogenados tóxicos) y a la radiación ultravioleta (su eficacia está limitada por turbidez y el color del agua).

#### 4.4 Definición de suelo y la importancia en el desarrollo de los cultivos

El suelo puede considerarse como un sistema disperso constituido por tres fases: sólida, líquida y gaseosa, que constituye el soporte mecánico y, en parte, el sustento de las plantas. El suelo es la mezcla de partículas provista pulverulentas, de agua y de aire que, provista de los elementos nutritivos necesarios para las plantas, pueden servir como sustentadora de una vegetación (Sánchez, 1993).

El suelo puede definirse como el producto de erosión de las rocas, evidenciado en las partes superficiales de la corteza terrestre y que contiene en ocasiones restos de materia orgánica descompuesta o en estado de descomposición. Pero el suelo, independientemente de su origen tiene una función: soportar una vegetación, y en él se deben dar las condiciones necesarias para el desarrollo de las plantas. Con este enfoque, nos encontramos con una concepción fisiológica vegetal que define el suelo como la mezcla de partículas sólidas pulverulentas, de agua y de aire que, provista de los elementos nutritivos necesarios para las plantas, puede servir como sustentadora de una vegetación (Navarro, 2003).

Los solutos, electrólitos y no electrólitos contenidos en la solución de suelo son las fuentes inmediatas de los nutrientes que necesitan las plantas. Este punto de vista en relación a la nutrición de las plantas es demasiado simplista, debido a que muchos de los mecanismos de interacción de suelo e iones pueden quitar y reemplazar tales iones en la solución de suelo incluyen: 1) intemperismo mineral, 2) descomposición de materia orgánica, 3) la lluvia, 4) las sales contenidas en el agua de riego, 5) fertilización y 6) liberación de iones retenidos por el coloide o la fracción coloidal o arcillosa del suelo. Los iones retenidos por el suelo son generalmente la fracción más grande de nutrientes disponibles para las plantas. Las velocidades de intemperización de los minerales por lo común son lentas comparadas con las necesidades de las plantas. Cuando se descompone la materia orgánica libera iones más rápidamente que el proceso de intemperización, pero la mayoría de estos iones reaccionan con la fase sólida del suelo antes de que las plantas o los microorganismos los puedan absorber (Sánchez, 1993).

#### 4.5 Principales macronutrientes en el suelo

De los trece elementos esenciales obtenidos del suelo por las plantas, seis son usados relativamente en grandes cantidades, estos son: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre. Se designan con el nombre de macronutrientes porque las plantas los utilizan en grandes cantidades. El crecimiento de las plantas puede ser retardado por varias causas: porque haya escasez de ellos en el suelo, porque resultan ser asimilables lentamente, o porque no estén adecuadamente equilibrados por los otros elementos nutritivos. A veces pueden existir las tres limitaciones juntas. Esto es cierto, con frecuencia, respecto al nitrógeno. El nitrógeno, fósforo y potasio se proporcionan al suelo comúnmente en forma de estiércol y fertilizantes comerciales. Por esto se llaman elementos fertilizantes. Asimismo, el calcio y el magnesio se encuentran, casi siempre, en forma de caliza, por lo que se llaman elementos calcáreos. El azufre, además de existir en el agua de lluvia, va corrientemente al suelo en forma de ingrediente incidental en algunos fertilizantes, como estiércol, superfosfato y sulfato amónico. En casos especiales, el azufre se aplica solo, para corregir deficiencias nutritivas o ajustar la reacción del suelo (Buckman, 1991).

La presencia de suficiente cantidad de elementos nutritivos en el suelo no garantiza por sí misma la correcta nutrición de las plantas, pues estos elementos han de encontrarse en formas moleculares que permitan ser asimilados por la vegetación. En síntesis, se puede decir que una cantidad suficiente y una adecuada disponibilidad de estos nutrientes en el suelo son fundamentales para el correcto desarrollo de la vegetación (Seoáñez, 1999).

##### 4.5.1 Funciones específicas de cada macronutriente

**Nitrógeno:** Proviene de la atmósfera o de los tejidos muertos, las bacterias del suelo lo transforman en amonio y nitrato, sustancias que se absorben por las raíces de las plantas. Se presenta en grandes cantidades en las plantas jóvenes, particularmente en las hojas. El nitrógeno forma parte de todas las células vivas, y está presente en la clorofila y en las proteínas, que en muchos casos funcionan como enzimas. La abundancia de nitrógeno se traduce en un crecimiento suculento y de color verde, en tanto que la deficiencia causa pérdida de color, reducción en la producción de proteínas, amarillamiento gradual y atrofia.

La deficiencia de nitrógeno se puede presentar en todos los tipos de suelo debido a la lixiviación del amonio y del nitrato, o por la desnitrificación de los suelos húmedos. La presencia de grandes cantidades de restos recientes de plantas provoca que las bacterias compitan con éstas por el nitrógeno disponible. La deficiencia de nitrógeno se puede remediar fácilmente por medio de la adición de fertilizantes, pero debe evitarse la

fertilización excesiva, ya que el sobrenadante puede contaminar las corrientes de agua cercanas (Martínez, 2009).

**Fósforo:** Es uno de los constituyentes de todas las células vivas. Está presente en el protoplasma, y se encuentra con mayor concentración en semillas; en consecuencia, aumenta la producción de éstas. La deficiencia de fósforo produce una coloración purpúrea en la plántula, un amarillamiento posterior, atrofia y maduración tardía. El fósforo disponible en el suelo puede ser apenas 1% o menos de la cantidad total existente. La solubilidad del fosfato está controlada por varios factores. Uno de ellos es la cantidad total de este compuesto en fase sólida (precipitado) que existe en el suelo. Cuando mayor el contenido total de fósforo del suelo, mayor la posibilidad de tener más fósforo en solución. Otro factor importante es el grado de contacto entre el fosfato en fase sólida y la solución del suelo. Conforme aumenta la exposición del fosfato a la solución del suelo y a las raíces de las plantas, así lo hace la capacidad del suelo para mantener las cantidades necesarias de reemplazo (Guzmán, 2004).

**Potasio:** Es esencial en todos los procesos metabólicos de la célula, aunque su naturaleza exacta es aún desconocida. Aparentemente, influye en la absorción de otros elementos y afecta tanto la respiración como la transpiración. También estimula la síntesis y el transporte de los carbohidratos; ayuda a reforzar el espesor de las paredes celulares y a fortalecer los tallos. Una deficiencia de este elemento puede producir doblez y amarillamiento en la puntas de las hojas y bordes de los cereales. Esto se puede remediar aplicando fertilizantes (Fitzpatrick, 1996).

**Calcio:** En forma de pectatos de calcio, constituye una parte de la estructura de la pared celular y es necesario para el desarrollo de los meristemos. Una deficiencia de este elemento conduce a la deformación de las partes en desarrollo, aunque los síntomas se detectan raramente en el campo. Las plantas obtienen el calcio de los minerales del suelo o de la caliza aplicada como fertilizante. Los minerales de calcio son tan predominantes que muy rara vez los suelos son deficientes en calcio excepto los suelos arenosos (los cuales contienen nada o muy poco de minerales de calcio). Muchos suelos orgánicos son ácidos y bajos en calcio por que los residuos de plantas originales son también bajos en calcio (Donahue, 1981).

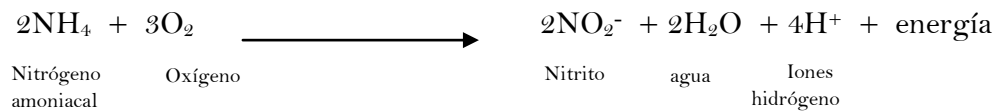
**Magnesio:** Es activo en los procesos enzimáticos y forma parte de la clorofila. Su deficiencia produce la decoloración de las hojas y en ocasiones la defoliación prematura. Los animales que se alimentan con este tipo de vegetación desarrollan hipomagnesemia, que se remedia al adicionar un fertilizante con magnesio o caliza con magnesio (Thompson, 1980).

#### 4.5.2 Formas en las que se encuentran los macronutrientes en el suelo

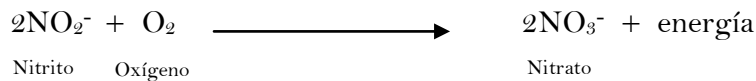
##### Nitrógeno

La mayor parte del nitrógeno que existe en los suelos se encuentra formado por parte de la materia orgánica, por lo que es inaccesible para las plantas en crecimiento. Muchas de las transformaciones en que interviene el nitrógeno se producen en el suelo, casi todas como resultado de la actividad microbiana. El nitrógeno de la materia orgánica está disponible para las plantas por medio de los procesos microbianos. En el primero, las proteínas y los compuestos relacionados se descomponen en aminoácidos mediante la reacción denominada aminización. Los organismos del suelo obtienen energía a partir de este proceso y utilizan parte del nitrógeno de los compuestos aminados que se transforman en amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y amonio ( $\text{NH}_4^+$ ). Los dos procesos, aminización y amonificación, se conocen como mineralización (Guzmán, 2004).

El amonio es convertido en nitrato principalmente por dos grupos de bacterias. Las del género Nitrosomonas convierten el amonio en nitrito:



Luego, Nitrobacter convierte el nitrito en nitrato:



Este proceso de dos etapas, denominado nitrificación, se realiza rápidamente en condiciones de oxígeno y humedad adecuada, temperatura cálida y pH óptimo. El nitrógeno se podría perder del suelo a la atmósfera mediante un proceso que convierte el nitrato en compuestos gaseosos de nitrógeno. Durante este proceso se denomina desnitrificación. En condiciones anaeróbicas debidas a una cantidad excesiva de humedad o la compactación del suelo, o ambas, algunas bacterias tienen la capacidad de utilizar el oxígeno de los nitratos para satisfacer sus necesidades. Este proceso, se forman varios gases, como óxido nítrico (NO), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y nitrógeno. A medida que estos gases se mueven a la atmósfera, el suelo pierde nitrógeno que las plantas podrían aprovechar (Guzmán, 2004).

##### Fósforo

El fósforo es absorbido por las plantas principalmente en forma de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{HPO}_4$ , lo que depende del pH del suelo. La mayor parte de la cantidad total de fósforo que existe en el

suelo está ligada químicamente a compuestos muy poco solubles. Lo anterior no es necesariamente una característica negativa de este elemento, pues la limitada solubilidad hace que sea lavado de la zona radical de las plantas en mínimas cantidades. En suelos, de neutros a alcalinos, se forman compuestos de fosfatos de calcio, mientras que en suelos ácidos se producen fosfatos de hierro y aluminio. La gran disponibilidad de este elemento en suelos es con un pH neutro (Buckman, 1991).

### **Potasio**

El potasio es absorbido por las plantas en forma de iones potasio ( $K^+$ ). En las células y los tejidos vegetales, este elemento no se halla combinado en forma de compuestos, como ocurre con el nitrógeno y el fósforo, sino que tiende a permanecer en forma iónica. El potasio es esencial en la translocación de azúcares y la formación de almidón. Las células oclusivas de las estomas lo requieren para que éstos se abran y cierren, proceso que es importante para el uso eficaz del agua. El potasio estimula el crecimiento de la raíz y mejora la resistencia de los cultivos a las enfermedades. Favorece la formación de vasos xilemáticos más grandes y distribuidos de manera más uniforme en todo el sistema radical. El potasio mejora el tamaño y la calidad de los frutos, granos y hortalizas y es esencial para los cultivos forrajeros de alta calidad. Mejora también la resistencia de las plantas perennes al frío infernal (Turk, 1971).

### **Calcio**

El calcio es absorbido por las plantas en forma de ion calcio ( $Ca^+$ ). Por ser un nutriente de naturaleza estructural, constituye un componente de paredes y membranas celulares y debe estar presente para la formación de nuevas células. Se piensa que contrarresta los efectos tóxicos del ácido oxálico al formar oxalato de calcio en las vacuolas de las células. El calcio, una vez que se deposita en los tejidos vegetales, ya no es posible removerlo, por lo que los tejidos jóvenes son los primeros en ser afectados cuando existen deficiencias de este nutriente (Collis, 1971).

### **Magnesio**

Las plantas absorben el magnesio en forma de ion magnesio ( $Mg^+$ ). La molécula de clorofila, esencial para la fotosíntesis, contiene este elemento. El magnesio funciona como activador de muchas enzimas vegetales que se requieren en los procesos de crecimiento. El magnesio se mueve dentro de las plantas y es translocado fácilmente de los tejidos maduros a los tejidos jóvenes cuando hay falta de este elemento (Thompson, 1980).

## Azufre

El azufre es tomado del suelo en forma de iones sulfato ( $\text{SO}_4^{=}$ ). En regiones donde la atmósfera es abundante en compuestos azufrados provenientes de fuentes industriales, también podría ser absorbido del aire como dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) a través de las hojas. Las deficiencias de azufre son bastante comunes y se han logrado identificar en una amplia gama de suelos y condiciones climáticas. El ion sulfato se lixivia en forma similar a como lo hace el nitrato, pero en menor grado (Guzmán, 2004).

### 4.6 Importancia de la materia orgánica en el suelo

La fracción orgánica del suelo consiste en organismos vivos, plantas secas y residuos de origen animal. En una unidad de masa, esta porción orgánica es la fracción químicamente más activa del suelo. Dicha porción orgánica es la fracción químicamente más activa del suelo, almacena varios elementos esenciales, estimula la estructura adecuada del suelo, es una fuente con capacidad de intercambio de cationes (CIC) y regula los cambios de pH, propicia también las relaciones convenientes entre el aire y el agua en los suelos y es un enorme depósito geoquímico de carbono. La materia orgánica del suelo (MOS) es una acumulación de materia de plantas muertas, parcialmente descompuestas y residuos de animales y plantas resintetizados parcialmente. La hojarasca y las raíces secas se descomponen rápidamente y sus residuos forman parte del humus. Algunas porciones permanecen en los suelos durante mucho tiempo. Los residuos de cultivos, maleza, hierba, hojas de árboles, gusanos, bacterias, hongos y actinomicetos también forman parte de la mezcla compleja denominada MOS, algunas definiciones de MOS se limitan sólo al humus y omiten cualquier consideración de residuos orgánicos sin descomponer la biomasa. El término MOS se emplea en su sentido más general y se refiere a componentes específicos por su nombre, cuando esta identificación es necesaria. Los microorganismos y las raíces comprenden solamente un porcentaje pequeño en masa de la MOS total (Navarro, 2003).

La materia orgánica es uno de los principales componentes y la fertilidad de los suelos, es de gran importancia para la producción de los cultivos. Así, la materia orgánica del suelo (Sánchez, 1993):

- Ayuda a reforzar los agregados del suelo, mejorando de esta manera la facilidad con que se cultiva y la estructura del mismo.
- Mejora la aireación y la infiltración del agua.
- Aumenta la capacidad de retención del agua.
- Proporciona mayor capacidad de intercambio catiónico.



- Produce un efecto amortiguador contra cambios rápidos en la reacción del suelo cuando se agregan a éste materiales generadores de condiciones ácidas o alcalinas.
- Forma compuestos orgánicos estables que aumentan la disponibilidad de los micronutrientes.
- Constituye una fuente de numerosos nutrientes de las plantas.
- Constituye una fuente de alimento para los microorganismos del suelo.

Los suelos varían grandemente en su contenido de materia orgánica. Un suelo típico de las praderas (por ejemplo, Mollison) puede contener del 5 al 6% de materia orgánica en su superficie, considerados los primeros 15 cm de profundidad, en tanto que el suelo desértico arenoso (aridisol) puede contener menos del 1%. Los suelos con drenaje insuficiente (Aquepto) tienen contenido mayores del 10%; algunos suelos turbosos (histoles) se aproximan al 100%. A pesar del contenido bajo en materia orgánica de la mayoría de los suelos minerales de la superficie terrestre (0.5 a 5%), el comportamiento coloidal activo de la fracción orgánica ejerce una enorme influencia en las propiedades físicas y químicas del suelo (Guzmán, 2004).

#### 4.7 Importancia del pH en el suelo

Los efectos de un pH bajo en el crecimiento de cultivos se deben, por lo general, a los niveles tóxicos de iones solubles de la solución del suelo. Dichos efectos pueden ser una consecuencia de una nutrición desbalanceada, ya que las concentraciones de iones considerados como nutrientes aumentan o disminuyen en condiciones ácidas (Sánchez, 1993).

Aunque los efectos del pH sobre los niveles de nutrientes de cultivos en los suelos son complicados y se interrelacionan. Los cultivos que pueden utilizar las formas amoniacales del nitrógeno poseen una ventaja considerable en suelos ácidos, porque la nitrificación (oxidación microbiana de amoníaco a nitrato) es lenta a pHs menores de 5.5. Los iones de amonio se pueden acumular en suelos forestales ácidos, debido a que los microorganismos que transforman el nitrógeno orgánico a amoníaco, dependen menos del pH del suelo que los organismos nitrificadores (Turk, 1971).

Otra faceta importante de aprovechamiento de nitrógeno existente en suelos ácidos es la dependencia del pH de la fijación del ion amonio entre las estructuras cristalinas de los minerales arcillosos laminares y expandibles. Dicha fijación, por lo general, disminuye al reducirse el pH del suelo. Aunque el mecanismo para este efecto del pH no se entiende por completo, es posible que la disminución se deba a la presencia de "islas" o zonas intermitentes de polímeros hidratados de aluminio y hierro, que evitan el colapso total de



las estructuras cristalinas del mineral y, en consecuencia, que disminuyan la fijación (Thompson, 1980).

El aprovechamiento del fosfato del suelo (principalmente  $H_2PO_4^-$  monómero y  $HPO_4^{2-}$ ) también depende considerablemente del pH y como en el caso del nitrógeno, sólo se conoce en forma parcial. Parece que el mecanismo principal para explicar la fijación del fosfato (aprovechamiento disminuido) en condiciones ácidas, es la precipitación de fosfatos de hierro y aluminio bastante insolubles. El aprovechamiento del fosfato también tiende a disminuir a un pH alto del suelo debido a la precipitación en compuestos de fosfato de calcio insolubles. El margen de pH para que exista un máximo aprovechamiento del fosfato se encuentra aproximadamente entre 6 y 7 para la mayoría de suelos agrícolas (Navarro, 2003).

Agregar cal a los suelos ácidos puede incrementar o disminuir el aprovechamiento del potasio. La disminución se puede atribuir al incremento de la fijación de potasio en suelos encalados. Esto es similar a la fijación del amonio. Donde la adición de cal incrementa el aprovechamiento del potasio, es posible que el suelo en su estado primitivo que haya retenido una cantidad de cationes nutrientes insuficientes para el desarrollo de los cultivos. Esto sería típico de suelos arenosos o de suelos tropicales muy intemperizados. Es posible que existan sitios de intercambio insuficientes en las capas superficiales de dichos suelos, capaces de retener al potasio y otros cationes nutrientes y así evitar su lixiviación. La capacidad de intercambio catiónico del suelo, aumenta con la adición de cal, retiene cantidades mayores de potasio dentro de la zona de las raíces y también la conserva durante un tiempo más largo (Collis, 1971).

#### 4.8 Balance de nutrientes en suelo

En los sistemas de agricultura sostenible es importante aplicar estrategias eficaces para reducir la dependencia de los fertilizantes minerales sin que disminuyan significativamente los rendimientos en la producción. Es así necesario un análisis completo y exhaustivo de la explotación con el fin de optimizar la productividad interna de la misma y minimizar los aportes externos. La cuantificación de los cambios en la reserva de nutrientes del suelo es crucial para prevenir e identificar problemas en el manejo de los sistemas agrícolas. Los balances de nutrientes, es decir, la diferencia entre los aportes y las extracciones de nutrientes del sistema pueden utilizarse como indicadores de estos cambios (Bindraban et al., 2000) y son por lo tanto herramientas imprescindibles en el control de los sistemas agrícolas sostenibles. Hay que tener en cuenta que un desequilibrio entre el aporte y la extracción de nutrientes por las plantas no solo refleja un costo innecesario para el agricultor, sino también un potencial efecto perjudicial para el medio ambiente (Granstedt, 1992a). Con el fin de establecer indicadores que pongan de manifiesto la sostenibilidad de los agroecosistemas. Uno de los indicadores propuesto por Smaling et al. (1993) es el

balance de nutrientes. Un balance positivo muy elevado conducirá, entre otras cosas, a contaminaciones en las aguas subterráneas y superficiales, mientras que un balance negativo puede llevar a una disminución en las reservas de nutrientes con las consiguientes pérdidas de fertilidad en el suelo, disminuyendo la producción de los cultivos y provocando finalmente el abandono de tierras agrícolas que previamente eran viables.

Los balances de nutrientes deben considerarse únicamente como una guía aproximada que indica si una rotación está equilibrada en nutrientes. Realmente no puede reemplazar los análisis del suelo y del material vegetal o el seguimiento del estado del cultivo, que en la práctica proporcionan la mejor información sobre la necesidad de medidas correctivas (Ribó, 2003).

#### 4.9 Características del cultivo de Lechuga

##### Origen

La lechuga *Lactuca sativa* L. pertenece a la familia *Compositae*, tribu *Cichoriae*. El centro de origen primario se ubica en el Medio-Oriente y área mediterránea. Existen referencias históricas de que era utilizada por los egipcios 3000 años AC, para extraer aceites de la semilla y para forraje. La primera descripción del cultivo se remonta a Teofrasto (300 AC) y sucesivamente Plinio y Columella, detallan la existencia de cuatro tipos de lechuga. Colón la trajo a América y existen referencias de su cultivo en Brasil (1650) y Haití (1865), (Bianco, 1990).

##### Taxonomía y Morfología

La lechuga es una planta anual y autógama, perteneciente a la familia *Compositae* y cuyo nombre botánico es *Lactuca sativa* L.

**Raíz:** la raíz, que no llega a sobrepasar los 25 cm. de profundidad, es pivotante, corta y con ramificaciones.

**Hojas:** las hojas están colocadas en roseta, desplegadas al principio; en unos casos siguen así durante todo su desarrollo (variedades romanas), y en otros se acogollan más tarde. El borde de los limbos puede ser liso, ondulado o aserrado.

**Tallo:** es cilíndrico y ramificado.

**Inflorescencia:** son capítulos florales amarillos dispuestos en racimos o corimbos.

**Semillas:** están provistas de un vilano plumoso.

### **Suelos Recomendados**

Los de alta fertilidad (alto contenido de materia orgánica), de buen drenaje con alta capacidad de retención de humedad y un pH entre 6.7 y 7.4. El suelo debe ser trabajado en profundidad (labores verticales hasta 30 cm.) para lograr buen drenaje y favorecer el lavado de las sales del agua de riego y de la fertilización.

Antes de la siembra debe pulverizar bien el suelo, especialmente teniendo en cuenta el pequeño tamaño de la semilla (800 a 1000 semillas pesan 1 gramo) y la profundidad a la que deberá colocarse la misma, que no excederá los 0.5 cm. La nivelación es un aspecto muy importante que deberá tenerse presente en la preparación del suelo, ya que de lo contrario ocurren encharcamientos que predisponen a ocasionar enfermedades fúngicas, como Sclerotinia, entre otras (Briones, 2007).

### **Distancias de siembra**

Se suelen hacer semilleros y luego trasplantar los plántones al huerto. Distancia de plantación en hileras de 30 cm y 20-30 cm entre plantas. Algunas variedades de lechuga tienen semilla que requiere luz para su germinación. Estos tipos de semilla no se deben cubrir con tierra, pero se deben presionar simplemente para que tengan buen contacto con la tierra finamente preparada. La semilla de lechuga no resiste un almacenamiento prolongado y es recomendable obtener nuevas semillas (Briones, 2007).

### **Clima**

La lechuga como todas las especies tienen temperaturas cardinales en las cuales efectúa su crecimiento/desarrollo, siendo la Temperatura óptima de 16 a 20 °C, la  $T_{\text{mínima}}$  6 °C y la  $T_{\text{máxima}}$  27°C, todas ellas sujetas a pequeñas variaciones en función del tipo varietal considerado. Es una especie tolerante a las bajas temperaturas, e incluso a las heladas cuando la planta es pequeña, mientras que cuando se encuentra próximo a la cosecha, la presencia de heladas ocasiona daños en las hojas externas, desmereciendo notoriamente su calidad y conservación. Con temperaturas diurnas  $> 27^{\circ}\text{C}$  las hojas se alargan rápidamente, entonces la cabeza resulta poco compacta, obteniéndose lechugas de poco peso y conservación (Gómez, 2000).

### **Humedad relativa**

El sistema radicular de la lechuga es muy reducido en comparación con la aérea, por lo que es muy sensible a la falta de humedad y soporta mal un periodo de sequía, aunque éste sea muy breve. La humedad relativa conveniente para la lechuga es del 60 al 80%. Los problemas que presenta este cultivo en invernadero es que se incrementa la humedad

ambiental, por lo que se recomienda su cultivo al aire libre, cuando las condiciones climatológicas lo permitan (Alzate et al., 2008)

**Duración del ciclo vegetativo**

Dura entre 60 y 100 días, desde la siembra hasta la cosecha.

**Plagas**

Pulgones, orugas verdes, rosquilla negra, minadores (Lyriomiza), mosca blanca.

**Contenido nutricional**

Esta hortaliza se caracteriza por ser rica en calcio y fibra. La lechuga es una hortaliza pobre en calorías, aunque las hojas exteriores son más ricas en vitamina C que las interiores.

Composición por 100 gramos de lechuga

Elemento	%
Agua	94
Proteínas	1.3
Grasas	0.2
Hidratos de carbono	3.0
Celulosa	0.7
Potasio	0.2509
Sodio	0.012
Calcio	0.030
Magnesio	0.026
Fósforo	0.047
Azufre	0.021
Cloro	0.062
Hierro	0.0007
Cinc	0.0005
Manganeso	0.0006
Flúor	0.00003
Cobre	0.00009

Alzate et al., 2008

## CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA

El trabajo de investigación se desarrolló de acuerdo con la metodología y actividades específicas correspondientes, resumidas en el diagrama de la figura 5.1. En los siguientes apartados se hace una descripción detallada de los aspectos más importantes de la metodología y procedimientos analíticos que se utilizaron en el estudio.

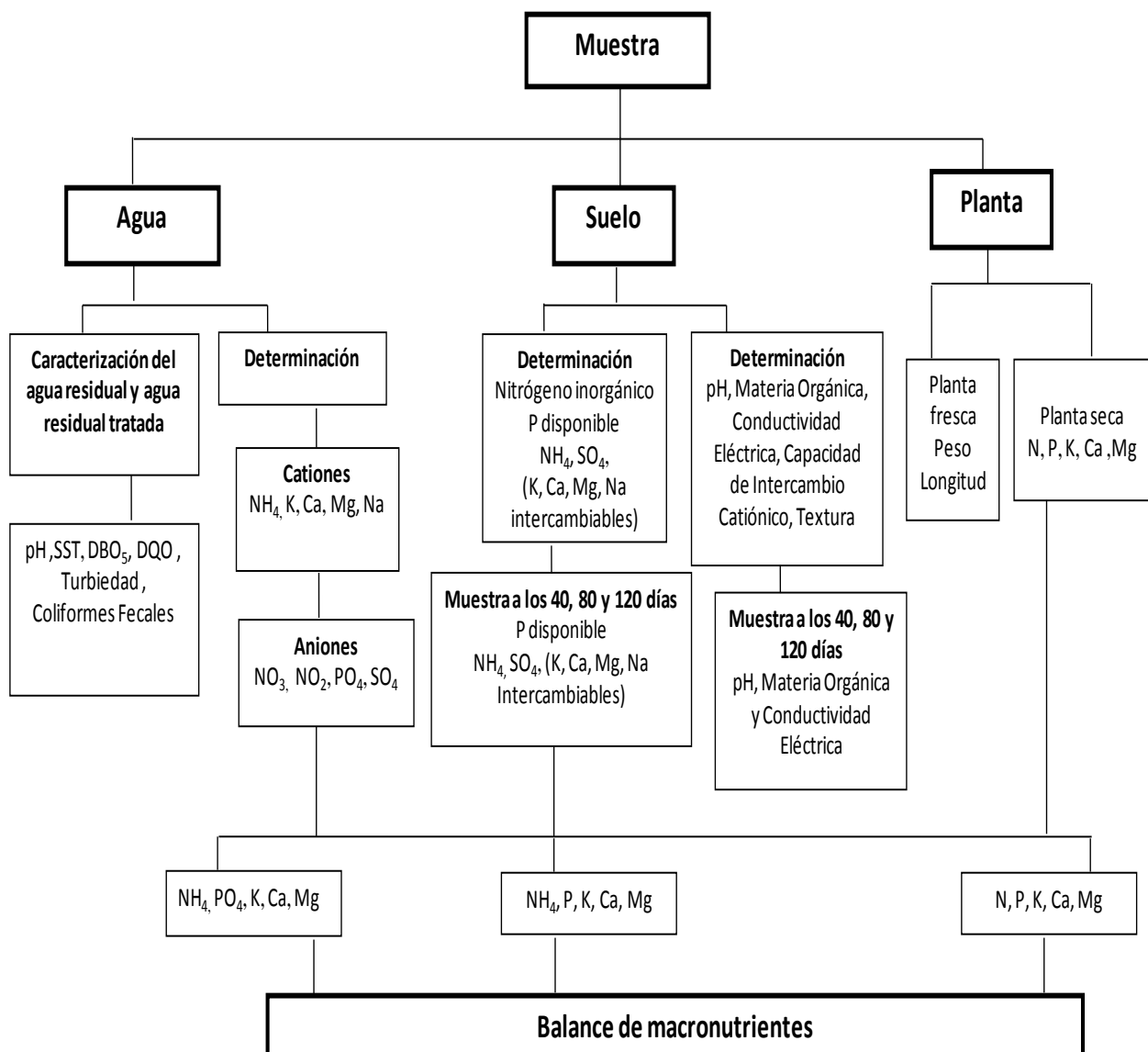


Figura 5.1 Diagrama general de la metodología experimental

## 5.1 Descripción del arreglo experimental utilizado para el cultivo de la lechuga

### 5.1.1 Construcción de invernadero

Para llevar a cabo las pruebas experimentales se tuvo que construir un invernadero con el fin de proteger el cultivo de la lechuga de cambios de clima extremos e inducir condiciones de temperatura y humedad favorables su crecimiento (clima templado sub húmedo). El invernadero fue ubicado en las instalaciones del Instituto de Ingeniería (Edificio 5.). En la construcción se utilizaron diversos materiales tales como alambre, malla ciclónica, lámina de fibra de vidrio, tubos galvanizados, entre otros. Primero se armó la base para dar soporte a la estructura, luego se procedió a realizar el montaje de la malla ciclónica. Para asegurar la malla ciclónica se utilizó alambre y se aplicaron puntos de soldadura, se colocó también una puerta hecha del mismo material para controlar el acceso al invernadero. Con la base y las paredes armadas se procedió a colocar el techo de láminas translucidas para permitir el paso de luz requerida por las plantas para llevar a cabo sus procesos fotosintéticos. Finalmente se colocó un plástico en las paredes laterales para proteger el cultivo de las bajas temperaturas así como se muestra en la figura 5.2.



Figura 5.2 Vista del costado del invernadero.

### 5.1.2 Condiciones ambientales del invernadero

Como se mencionó anteriormente, con el invernadero se buscó mantener condiciones de temperatura, humedad, luz en los intervalos óptimos para el desarrollo de la lechuga. La temperatura es un parámetro que debe controlarse en la medida de lo posible, el intervalo óptimo oscila entre los 10 y los 25°C. Se recomienda mantener un clima templado sub-húmedo.



### 5.1.3 Cajones de madera utilizados como medio de contención del suelo

Se utilizaron 10 cajones de madera con las medidas que se indican en la figura 5.3, nueve de ellos poseen las dimensiones de la figura (a) y uno más, por disposición de espacio, las que se muestran en la figura (b); en ambos casos el volumen de suelo fue el mismo.

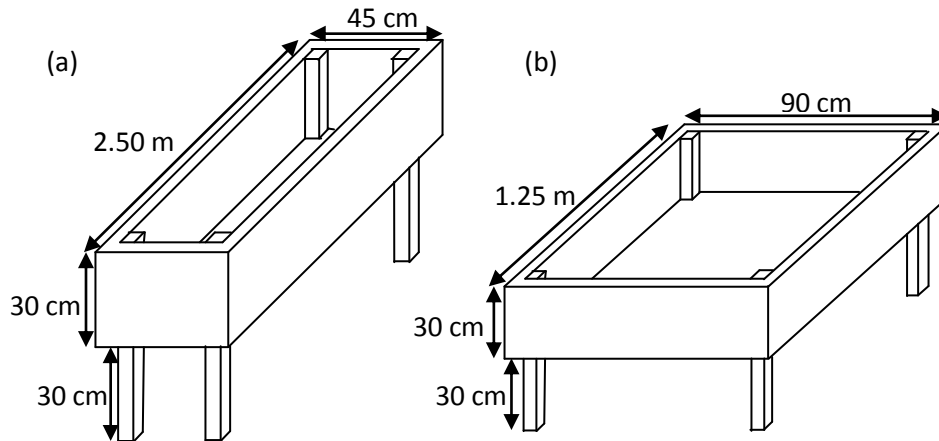


Figura 5.3. Descripción de los cajones para los surcos

Los cajones fueron perforados en la parte del fondo a modo de drenaje para evitar la posible retención y estancamiento de agua lo cual puede resultar perjudicial para las plantas (Figura 5.4). De igual manera fueron recubiertos con polietileno para que proteja la madera del agua y evitar con ello su deformación.

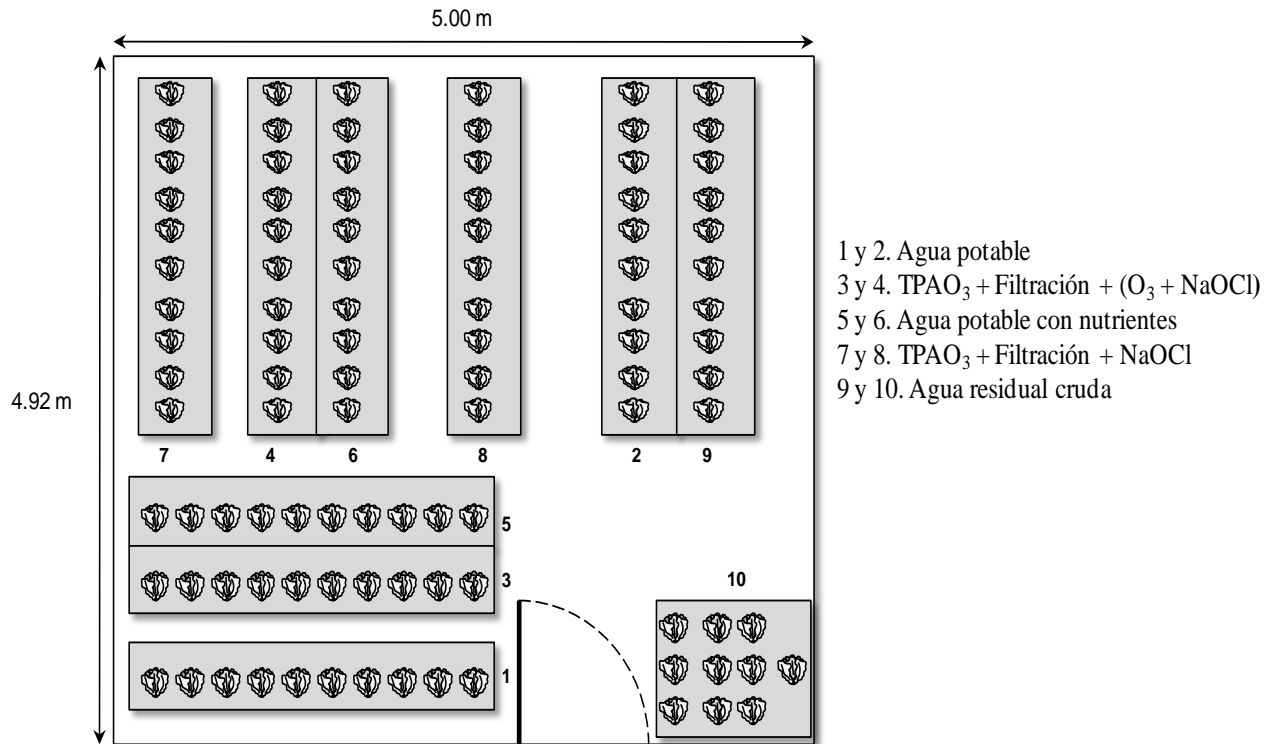


Figura 5.4 Perforación y forrado de cajones

#### 5.1.4 Sembrado de lechuga y disposición del cultivo en los cajones

El suelo que se empleó en el experimento es proveniente del Ajusco es un suelo virgen el cual no ha tenido ningún uso y es recomendable para la agricultura. En los cajones se colocó 75 Kg de suelo cubriendo un volumen del cajón de 0.16875 m<sup>3</sup> esto fue con la finalidad de simular surcos como se utilizan en la agricultura.

Antes de pasar las plántulas de lechugas a los cajones estuvieron un mes en germinación, 100 plántulas de lechugas fueron colocadas en los diez cajones, cada cajón contenía 10 plántulas, dos cajones por tipo de agua utilizada para riego como se muestra en la figura 5.5. El periodo para obtener la cosecha fue 120 días del 12 de enero al 12 de abril del 2011.



**Figura 5.5** Asignación de cajones irrigados con los diferentes tipos de agua

#### 5.1.5 Riego controlado

La forma de irrigar las plantas fue midiendo el volumen de agua con una probeta, el riego fue cerca de la planta sin tocar las hojas, fueron irrigadas cada tercer día conforme a la humedad del suelo, se inició el riego con 100 mL de agua por planta hasta llegar con un volumen final de 400 mL por planta con los diferentes tipos de aguas.



## 5.2 Tipos de aguas empleadas en las pruebas experimentales

En esta investigación se emplearon cinco tipos de agua: agua potable (A), agua potable con nutrientes (B), agua residual cruda (E), agua residual sometida a un tratamiento fisicoquímico con las siguientes etapas Tratamiento Primario mejorado con ozono, filtración con arena de cuarzo y desinfección con ( $O_3 + NaOCl$ ) (C) y únicamente con hipoclorito de sodio (D).

### 5.2.1 Agua potable (control)

Fue utilizada como testigo y para evaluar el comportamiento de los nutrientes originales del suelo, esta agua proviene de la red de Ciudad Universitaria.

### 5.2.2 Agua potable con nutrientes

El propósito de emplear este tipo de agua fue para simular condiciones ideales de nutrientes para el cultivo y compararla con un agua residual tratada. Se preparó con nutrientes, con un fertilizante comercial que es utilizado en la agricultura con la marca Ultrasol Multipropósito. Es un fertilizante que contiene N, P, K + S + Mg + Microelementos 100% soluble, especialmente diseñado para servir como formulación auxiliar en cualquier etapa fenológica de los cultivos fertirrigados. Debido a su relación NPK 1:1:1 y a su completo contenido de macro y micronutrientes, este producto es un eficiente comodín capaz de corregir cualquier deficiencia, garantizando una óptima nutrición de los cultivos. Aporta un óptimo balance de Nitrógeno Nítrico y Amoniacal. Fósforo en forma de fosfato y Potasio 100% soluble y libre de cloro. En la siguiente tabla 5.1 proporciona el contenido de macronutrientes, micronutrientes, pH y conductividad eléctrica que contiene el fertilizante:

**Tabla 5.1 Propiedades del fertilizante comercial (Marca Ultrasol Multipropósito)**

Propiedades	Fertilizante
Nitrógeno (N)	180 mg/L
Fósforo ( $P_2O_5$ )	180 mg/L
Potasio ( $K_2O$ )	180 mg/L
Magnesio (MgO)	5 mg/L
Azufre (S)	8 mg/L
Hierro (Fe EDTA)	0.4 mg/L
Manganeso (Mn)	0.2 mg/L
Zinc (Zn)	0.2 mg/L
Boro (B)	0.1 mg/L
Molibdeno (Mo)	0.1 mg/L
Cobre (Cu)	0.1 mg/L
pH	5.15
Conductividad Eléctrica (dS/m)	1.20

### 5.2.3 Tratamientos de agua residual

#### 5.2.3.1 Muestreo del agua residual cruda

Para las pruebas experimentales se utilizó agua residual cruda, la cual ha pasado por un pretratamiento en el que todas las partículas de mayor tamaño han sido eliminadas (influyente). Esta agua proviene de la planta de tratamiento de agua residual “Cerro de la Estrella”. El muestreo fue cada ocho días con un volumen de 80L, el volumen que se empleó por tratamiento fue de 70L por semana. La muestra se recolectaba en garrafones de plástico con una capacidad de 20L etiquetados con fecha y hora del muestreo. Para preservar la muestra se colocaron en un cuarto frío a una temperatura de 4°C hasta su uso.

#### 5.2.3.2 Tratamiento primario avanzado mejorado con ozono (TPAO<sub>s</sub>)

El tratamiento primario avanzado mejorado con ozono fue llevado a cabo de acuerdo a Campos Reales et al, 2008. Se utilizó un reactor de 70 litros que fue acoplado a una unidad en línea de oxidación para producir la coagulación-floculación con una dosis de Sulfato de Aluminio de 30 mg/L y con 2 mg/L de ozono; en la Tabla 5.2 se enlistan las condiciones de mezclado que se emplearon.

**Tabla 5.2. Condiciones de mezclado empleadas en el reactor de 70 L**

Proceso	Régimen (RPM)	Tiempo (min)
Coagulación	100	1
Floculación	30	20
Sedimentación	0	60

La unidad de oxidación está conformada por el gas de alimentación, el generador de ozono, el reactor (contactor gas-liquido), un analizador de ozono gas conectado en línea y una unidad de destrucción catalítica de ozono. Como se muestra en la figura 5.6, la producción de ozono se realizó a partir de aire de la atmósfera enriquecido con oxígeno el cual es obtenido mediante un separador de aire (Airsep modelo AS-12), se alimenta una corriente de gas enriquecida con oxígeno (90 ± 5%) a un generador de ozono (Labo 76 marca Emery Trailigaz) con capacidad de producción de 19 g O<sub>3</sub>/h. El ozono así producido se introducía entonces al reactor que contenía al agua por medio de un difusor tubular Flexair (5-20 µm de tamaño de poro) modelo 29-305, LP, 1X3, N. El excedente de ozono que sale del reactor es derivado hacia un analizador de ozono en fase gas (Teledyne modelo 465H) y por último, a una unidad de destrucción catalítica para su liberación segura al ambiente.

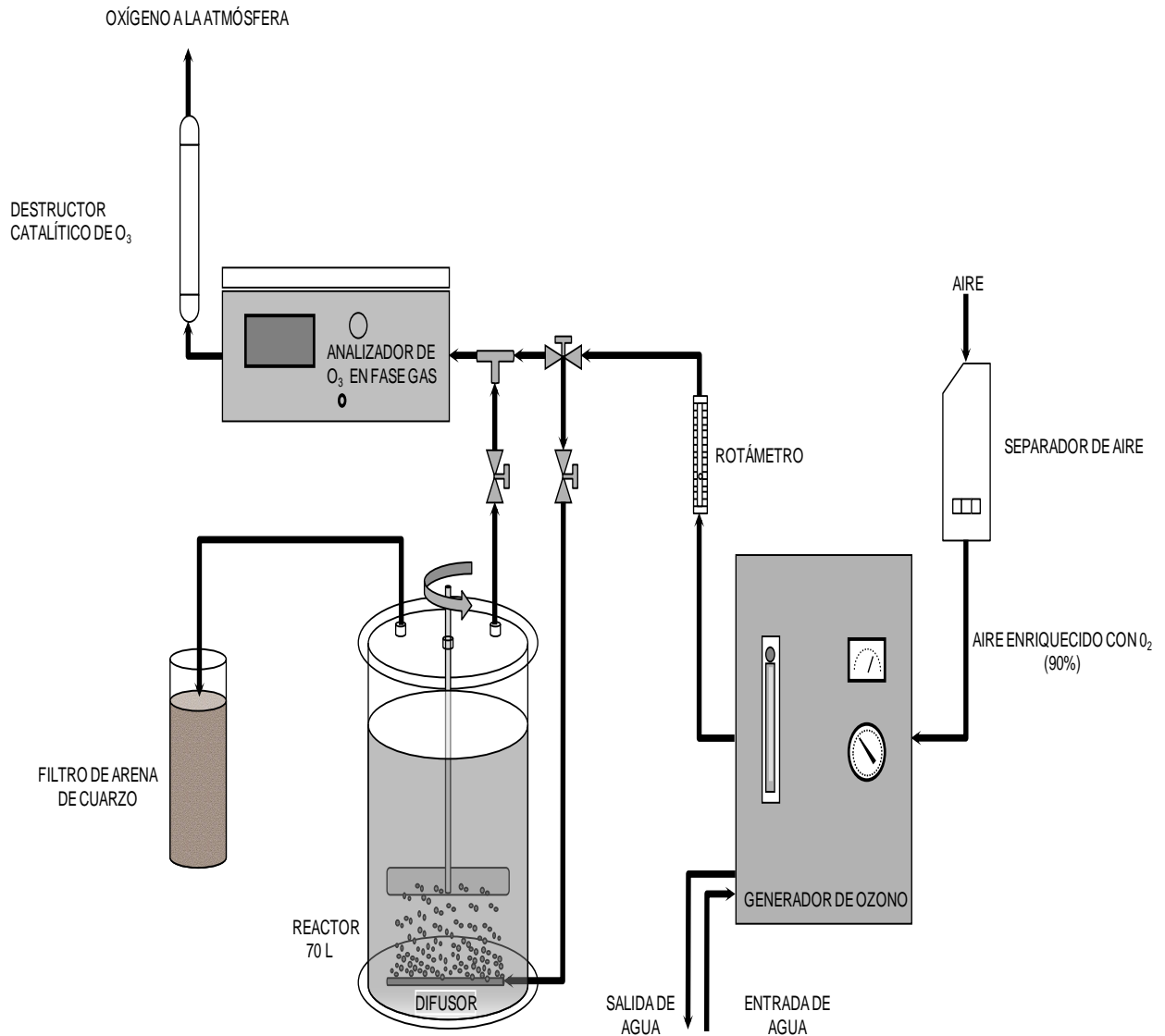


Figura 5.6 Arreglo experimental del TPAO<sub>3</sub>.

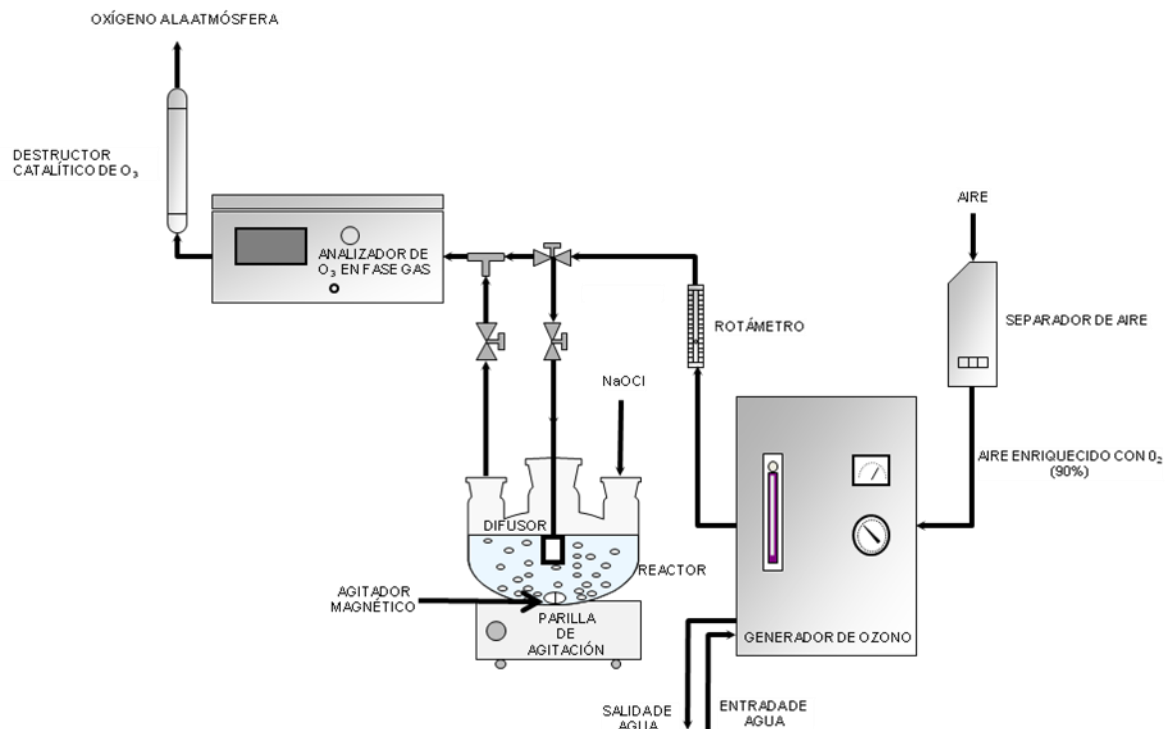
### 5.2.3.3 Filtración

Después llevar a cabo el TPAO<sub>3</sub> la siguiente operación del tratamiento fue la filtración, la cual se realizó en una columna de acrílico que contenía arena de cuarzo tamizado con tamaño de 10µm como medio filtrante. Lo anterior con el fin de remover por un lado los

huevo de helminto presentes, cuyo tamaño oscila entre 20 y 80  $\mu\text{m}$  y el remanente de sólidos suspendidos.

#### 5.2.3.4 Desinfección

La desinfección se realizó en dos etapas. La primera con ozono, aplicando una dosis de ozono de 20 mg/L y la segunda con una dosis de hipoclorito de sodio de 2 mg/L con un tiempo de contacto de 60 minutos. El arreglo experimental de las pruebas de desinfección se muestra en la Figura 5.7. El sistema de ozonación utilizado fue el mismo que el empleado para el TPAO<sub>3</sub>. La desinfección se llevó a cabo en un reactor agitado con capacidad de 5L en el cual el agua se agitó con una barra magnética. Una salida del reactor se conectó al analizador de ozono en fase gas. En la primera entrada se introdujo un difusor de vidrio poroso (10-15 $\mu\text{m}$  de tamaño de poro) para introducir el ozono producido. La segunda entrada fue para la adición de NaOCl después de ozonar el efluente.



**Figura 5.7** Arreglo experimental de la desinfección con ozono y con hipoclorito de sodio

Para garantizar la calidad de agua residual y tratada, se tomaron 5 muestras durante los 120 días y se determinaron los siguientes parámetros fisicoquímicos y microbiológicos: pH, DQO, DBO<sub>5</sub>, SST, Turbiedad y Coliformes fecales; las determinaciones se llevaron a

cabo de acuerdo a los Métodos normalizados para el Análisis de Agua Potable y Residual (APHA-AWWA-WPCF, (1992).

### **5.3. Cuantificación del contenido de macronutrientes en agua, suelo y cultivo**

#### **5.3.1 Procedimiento de muestreo, preservación y procesamiento de las muestras**

Para determinar los iones en el agua se preparó una muestra compuesta, se apartaba el 10% del volumen empleado de los diferentes tipos de agua empleados en el proceso de la irrigación, respectivamente. Las muestras eran recolectadas en recipientes de plástico debidamente identificados con fecha y tipo de agua y preservadas a una temperatura de 4°C. Al final del experimento del cultivo de la lechuga las muestras fueron analizadas por el equipo de cromatografía de iones.

El muestreo del suelo consistió en tomar 100g de suelo por planta irrigada, para formar una muestra compuesta con un total de 2 kg de suelo por tipo de agua. Para todo el experimento del cultivo de la lechuga se consideró un total de cuatro muestras por cada tipo de agua utilizado: una del suelo inicial sin irrigar, y tres de suelo irrigado a los 40, 80 y 120 días de prueba, respectivamente. Las muestras de suelo se colocaron en bolsas de plástico debidamente identificadas las cuales fueron preservadas a 4 °C hasta su análisis. El suelo fue secado y tamizado y posteriormente enviado al “Departamento de Suelos Laboratorio Central Universitario” de la Universidad de Chapingo para realizar el análisis respectivo de nutrientes, en la tabla 5.3 se enlistan los métodos utilizados.

Las muestras del cultivo de lechuga se tomaron en la etapa de cosecha. Por cada tipo de agua se obtuvieron 20 plantas a partir de las cuales se elaboro una muestra compuesta. Para cuantificar el contenido nutricional las muestras de lechuga fueron lavadas con agua de la llave y se dejaron secar a temperatura ambiente. Previo al análisis se pesaron y se midieron a partir de donde empieza la raíz hasta la hoja más larga, se colocaron en una bolsa de plástico etiquetada con fecha y tipo de agua. Ya preparadas las muestras se trasladaron al “Departamento de Suelos Laboratorio Central Universitario” de la Universidad de Chapingo, para su análisis.

En la Tabla 5.3 se muestran los parámetros, técnicas ó métodos de acuerdo a normas establecidas que se emplearon en el análisis de las muestras agua, suelo y planta.

Tabla 5.3 Parámetros y técnicas que se emplearon en el análisis de las muestras de agua, suelo y planta

	Parámetros	Técnicas y Normas
<b>Agua</b>		
Cationes	NH <sub>4</sub> <sup>+1</sup> , K <sup>+1</sup> , Ca <sup>+2</sup> , Mg <sup>+2</sup> y Na <sup>+1</sup>	Técnica cromatografía de iones (Modelo ICS 1500 de DIONEX).
Aniones	NO <sub>3</sub> <sup>-1</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-1</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> y SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	
<b>Suelo</b>		
Cationes intercambiables	K <sup>+1</sup> , Na <sup>+1</sup> , Ca <sup>+2</sup> y Mg <sup>+2</sup>	K y Na: Espectrofotometría de emisión de flama (Marca. Coler Parmer, Modelo. 562500) Ca y Mg: Espectrofotometría de absorción atómica (Marca. UNICAM SOLAR, Modelo. 989) La metodología se llevó de acuerdo a la NOM-021- SEMARNAT-2001
Propiedades fisicoquímicas	pH, Conductividad eléctrica y Materia Orgánica y P disponible	Se determinaron de acuerdo a la metodología establecida en la NOM-021-SEMARNAT-2001
<b>Planta</b>		
		*Digestión con mezcla diácida
	N	Con el método Kjeldahl
	P	Fotocolorímetro (Marca. Thermo Espectronic, Modelo. Génesys 10 uv)
	K <sup>+1</sup>	Espectrofotómetro de emisión de flama (Marca. Coler Parmer, Modelo 562500)
	Ca <sup>+2</sup> y Mg <sup>+2</sup>	Espectrofotómetro de absorción atómica (Marca. UNICAM SOLAR, Modelo. 989)

#### 5.4 Balance de macronutrientes en agua, suelo y cultivo

El balance de macronutrientes en el sistema agua, suelo y cultivo, se realizó con los datos obtenidos al final de la experimentación; para realizar este balance se consideraron los siguientes macronutrientes: Nitrógeno en forma de amonio; Fósforo en el caso del agua fue en forma de fosfatos, y en suelo fósforo disponible; y en planta, Potasio, Magnesio y Calcio. La ecuación de balance fue establecida tomando como base lo reportado por Lu et al., 2011. Con la siguiente ecuación se determinó el balance:

#### Ecuación general del balance de macronutrientes

$$A+B = C + D$$

**A**= Concentración de nutriente en agua ( $\text{mgL}^{-1}$ )  $\times$  el volumen (L)

**B**=Concentración de nutriente en suelo sin irrigar con los diferentes tipos de agua  $\times$  el peso del suelo empleado (kg)

$$A = \left( \frac{\text{mg}}{\text{L agua}} \right) (\text{L agua})$$

$$B = \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg suelo}} \right) (\text{kg suelo})$$

**C**= Concentración de nutriente en suelo acumulado ( $\text{mgkg}^{-1}$ )  $\times$  el peso del suelo empleado (kg)

**D**= Concentración de nutriente de la planta ( $\text{mgkg}^{-1}$ )  $\times$  el peso de la planta en seco (kg)

$$C = \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg suelo}} \right) (\text{kg suelo})$$

$$D = \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg planta}} \right) (\text{kg planta})$$

**CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

**6.1 Caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua residual cruda y tratada**

Al caracterizar las muestras promedio de agua residual cruda y tratada se puede observar que las concentraciones del agua residual cruda presentan valores bajos de SST (56.3 mg/L) y DBO<sub>5</sub> (172.0 mg/L) con DQO de 322.4 mg/L y contenido de bacterias Coliformes Fecales de 1.14 x 10<sup>7</sup>. Por otra parte, en las columnas que corresponden al agua residual tratada, se observa una disminución del 71% de sólidos suspendidos totales, el cual es ve favorecido debido al efecto de microfloculación que propicia la presencia del ozono en bajas dosis en el TPA (Orta de Velásquez et al., 2008). Así también el agua tratada cumple con la NOM-001-SEMARNAT-1996 en el reúso del riego agrícola restringido al tener una remoción de Coliformes Fecales. Ver tabla 6.1

Tabla 6.1. Características fisicoquímicas y microbiológicas en Agua residual cruda, agua residual tratada, TPAO<sub>3</sub> + Filtración + Desinfección (O<sub>3</sub> + NaOCl) y TPAO<sub>3</sub> + Filtración + Desinfección (NaOCl)

Parámetro	Agua residual cruda	TPAO <sub>3</sub> + F+ (O <sub>3</sub> + NaOCl)	TPAO <sub>3</sub> + F+ NaOCl	Metcalf & Eddy, 2003		
				Criterio de concentración		
				Débil	Medio	Fuerte
pH	7.5 ± 0.03	7.6 ± 0.06	7.6 ± 0.01			
SST (mg/L)	56.3 ± 8.7	16.2 ± 14.3	41.6 ± 12.1	120	210	400
DQO (mg/L)	322.4 ± 44.6	82.6 ± 28.1	82.5 ± 38.0	250	430	800
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	172.0 ± 12.2	31.3 ± 11.3	34.2 ± 11.1	110	190	350
Turbiedad (UTN)	234.0 ± 40.3	84.5 ± 0.7	87.3 ± 3.1			
Coliformes fecales (UFC/100 mL)	1.14 x 10 <sup>7</sup>	0	1X10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup> -10 <sup>5</sup>	10 <sup>4</sup> -10 <sup>6</sup>	10 <sup>5</sup> -10 <sup>8</sup>



### 6.2 Determinación de cationes y aniones en los diferentes tipos de agua

De las muestras compuestas de los diferentes tipos de agua se llevó a cabo la determinación de cationes y aniones, la tabla 6.2 muestra los valores obtenidos. El agua potable se encuentra dentro de los valores característicos reportados tanto en la bibliografía (Jiménez, 2001) como en la normatividad correspondiente NOM-127-SSA1-1994. Como es de esperarse el agua potable a la que se adicionaron nutrientes presenta concentraciones altas de  $\text{NH}_4$  de 79.73 mg/L, K de 147.90 mg/L,  $\text{NO}_3$  de 18 mg/L y  $\text{PO}_4$  de 11.49 mg/L. Al comparar el agua residual cruda con el agua residual tratada se observa que, en la mayor parte de nutrientes las variaciones de concentración son mínimas, por lo que se deduce que el tratamiento aplicado no afecta su contenido, lo que significa que el agua tratada aparte de cumplir con la calidad microbiológica requerida puede proporcionar nutrientes al suelo que pueden contribuir en la productividad de los cultivos irrigados.

Tabla 6.2 Concentración de cationes y aniones en los diferentes tipos de agua para la irrigación

Cationes y Aniones mg/L	Agua potable	Agua potable con nutrientes	TPAO <sub>3</sub> + F + (O <sub>3</sub> + NaOCl)	TPAO <sub>3</sub> + F + NaOCl	Agua residual cruda
NH <sub>4</sub>	0.20	79.73	24.41	27.81	27.62
K	5.19	147.90	14.58	12.05	13.39
Ca	21.72	24.31	27.85	27.11	29.43
Mg	20.09	25.40	18.95	18.19	19.42
Na	31.01	31.22	63.58	60.09	63.60
PO <sub>4</sub>	0.68	11.49	4.87	4.38	9.50
SO <sub>4</sub>	34.48	71.73	76.14	78.13	60.61
NO <sub>3</sub>	2.06	18.10	14.23	11.08	12.70
NO <sub>2</sub>	0.04	0.03	0.58	0.32	0.42

TPAO<sub>3</sub>: Tratamiento Primario Avanzado con ozono, F: Filtración.40 muestras fueron analizadas

### 6.3 Caracterización del suelo antes de ser irrigado con los diferentes tipos de agua

La tabla 6.3 muestra la caracterización del suelo. La textura que presenta es la de un suelo franco arenoso. De acuerdo la NOM-021-SEMARNAT-2001, el valor obtenido de la conductividad eléctrica indica un nivel de salinidad despreciable, el pH está clasificado como neutro, presenta alto contenido de materia orgánica, concentraciones medias de N, K y bajas de P, Ca, Mg. De acuerdo a literatura reportada un suelo franco arenoso es apto para la agricultura, pero este suelo presenta deficiencias de P, Ca, Mg que son necesarias para el desarrollo del cultivo y por consiguiente se tienen que emplear fertilizantes para tener un desarrollo adecuado de la planta. Por otra parte, el suelo presenta una baja Capacidad de Intercambio Catiónico, esto implica que las arcillas están limitadas para adsorber y desorber cationes que se encuentran disponibles en la solución del suelo (Navarro, 2003).

**Tabla 6.3. Caracterización del suelo**

<b>Parámetros</b>	<b>Suelo</b>
pH	6.60
Materia Orgánica (%)	6.59
N (mg kg <sup>-1</sup> )	21.70
P (mg/kg)	13.11
K intercambiable (mg/kg)	110.00
Na intercambiable (mg/kg)	116.00
Ca intercambiable (mg/kg)	1448.00
Mg intercambiable (mg/kg)	473.00
SO <sub>4</sub> (mg/kg)	82.15
Textura	Franco arenoso
CIC (Cmol/kg)	13.80
C.E (dS/m)	0.10

#### 6.4 Concentración de macronutrientes en suelo ( $\text{NH}_4^{+1}$ , P disponible, $\text{K}^{+1}$ , $\text{Ca}^{+2}$ , $\text{Mg}^{+2}$ , $\text{Na}^{+1}$ y $\text{SO}_4^{+2}$ ) después ser irrigado con los diferentes tipos de agua

De acuerdo a la línea base que corresponde al valor inicial del  $\text{NH}_4^{+}$ , el suelo irrigado con agua potable con nutrientes y agua residual tratada con  $\text{TPAO}_3 + \text{F} + (\text{O}_3 + \text{NaOCl})$  presenta una tendencia similar en la concentración de  $\text{NH}_4^{+}$ ; a los 40 días hay un incremento de 101.68 mg/kg, 33.61 mg/kg respectivamente, esto se debe a la adición de  $\text{NH}_4^{+}$  por los tipos de agua; a los 80 días presenta una disminución de 14.91 mg/kg y 13.96 mg/kg respectivamente, esto se le puede atribuir a que la lechuga lo asimiló en esta etapa del cultivo. A los 120 el suelo experimenta una acumulación de  $\text{NH}_4^{+}$  (132.41 mg/kg y 186.40 mg/kg respectivamente), esto puede ser a que la lechuga ya adquirió lo necesario.

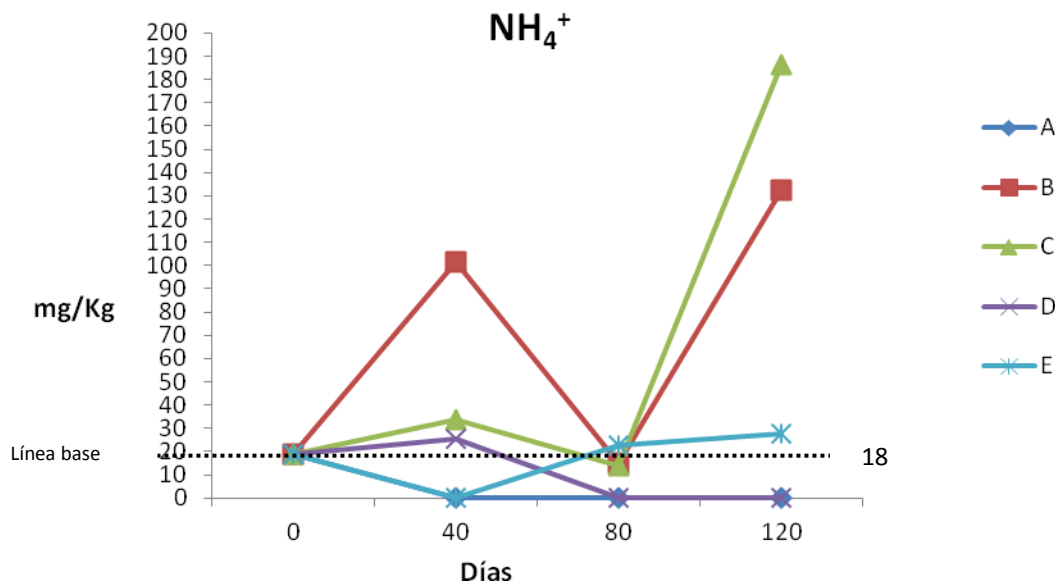


Figura 6.1. Concentración de  $\text{NH}_4^{+}$  en suelo irrigado con los diferentes tipos de agua

**Nota:** A: Agua potable, B: Agua potable con nutrientes, C:  $\text{TPAO}_3 + \text{Filtración} + (\text{O}_3 + \text{NaOCl})$  D:  $\text{TPAO}_3 + \text{Filtración} + \text{NaOCl}$ , E: Agua residual cruda

La concentración de P en el suelo se presenta en la figura 6.2, se observa que al irrigar el suelo con agua potable complementada con nutrientes (B), agua residual cruda (E) y agua residual tratada (C), este nutriente presentó un comportamiento similar, registrando un incremento a los 40 días del cultivo. Al irrigar el suelo con agua potable con nutrientes la concentración de P en el suelo se fue acumulando y, a los 40 días se alcanzó una concentración de 34.24 mg/kg, a partir de los 80 días, la concentración de P fue disminuyendo, esto se puede atribuir a la asimilación que presentó la lechuga por su desarrollo quedando una concentración de 10.60 mg/kg.

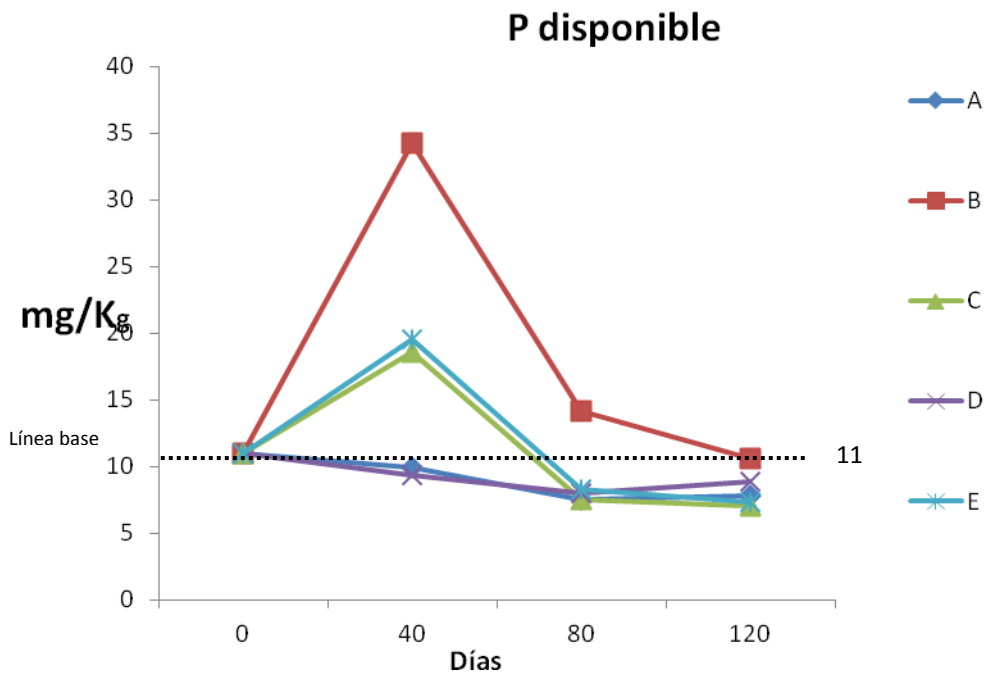


Figura 6.2. Concentración de P disponible en suelo irrigado con los diferentes tipos de agua

**Nota:** A: Agua potable, B: Agua potable con nutrientes, C: TPAO<sub>3</sub> +Filtración + (O<sub>3</sub> + NaOCl) D: TPAO<sub>3</sub> +Filtración + NaOCl, E: Agua residual cruda

La concentración de  $\text{SO}_4^{-2}$  en el suelo presentó una tendencia de acumulación similar en el agua potable con nutrientes (B), agua residual cruda (E) y agua residual tratada (C y D). La mayor concentración se encontró en el suelo irrigado con agua residual tratada con  $\text{TPAO}_3 + \text{F} + (\text{O}_3 + \text{NaOCl})$  de 386.30 mg/kg debido a la adición de sulfato durante el proceso de coagulación-floculación, como se muestra en la figura 6.3.

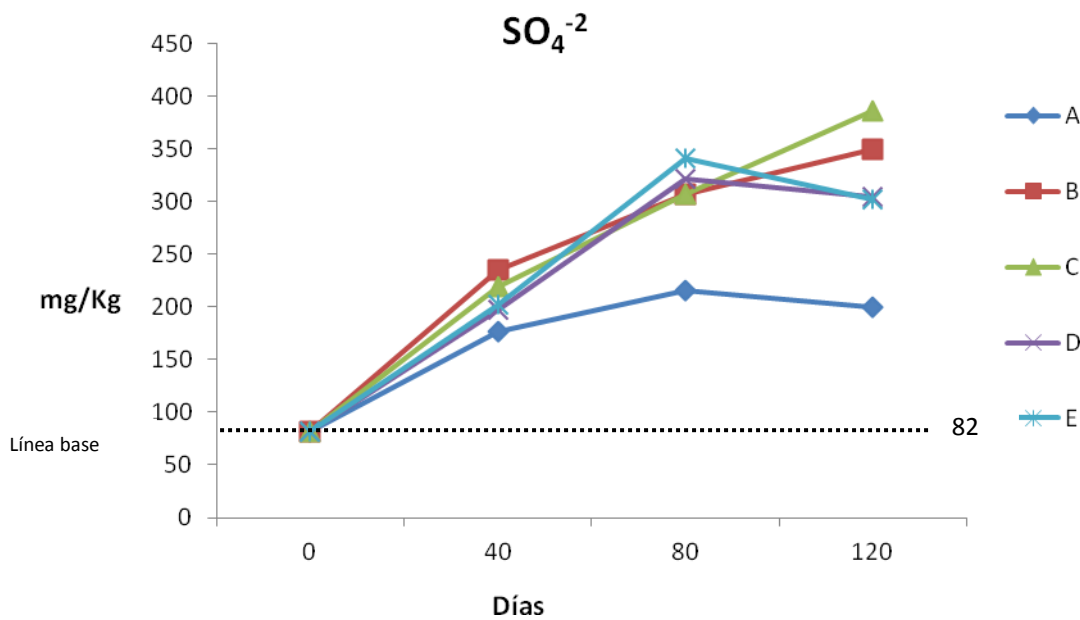


Figura 6.3. Concentración de  $\text{SO}_4^{-2}$  en suelo irrigado con los diferentes tipos de agua

**Nota:** A: Agua potable, B: Agua potable con nutrientes, C:  $\text{TPAO}_3$  +Filtración +  $(\text{O}_3 + \text{NaOCl})$  D:  $\text{TPAO}_3$  +Filtración +  $\text{NaOCl}$ , E: Agua residual cruda

De acuerdo a la figura 6.4, la concentración de  $K^+$  en el suelo irrigado con el agua potable con nutrientes (B) tiene una tendencia diferente en comparación a los demás tipos de agua, cuando se compara con el contenido inicial del suelo (110 mg/kg) se puede observar que hay una acumulación a los 40 días de 560 mg/kg esto es por la concentración de este nutriente que contiene el tipo de agua, a partir de los 80 días hasta los 120 días la concentración disminuye hasta quedar con 432 mg/kg, esto se le puede atribuir por la asimilación que tiene la lechuga.

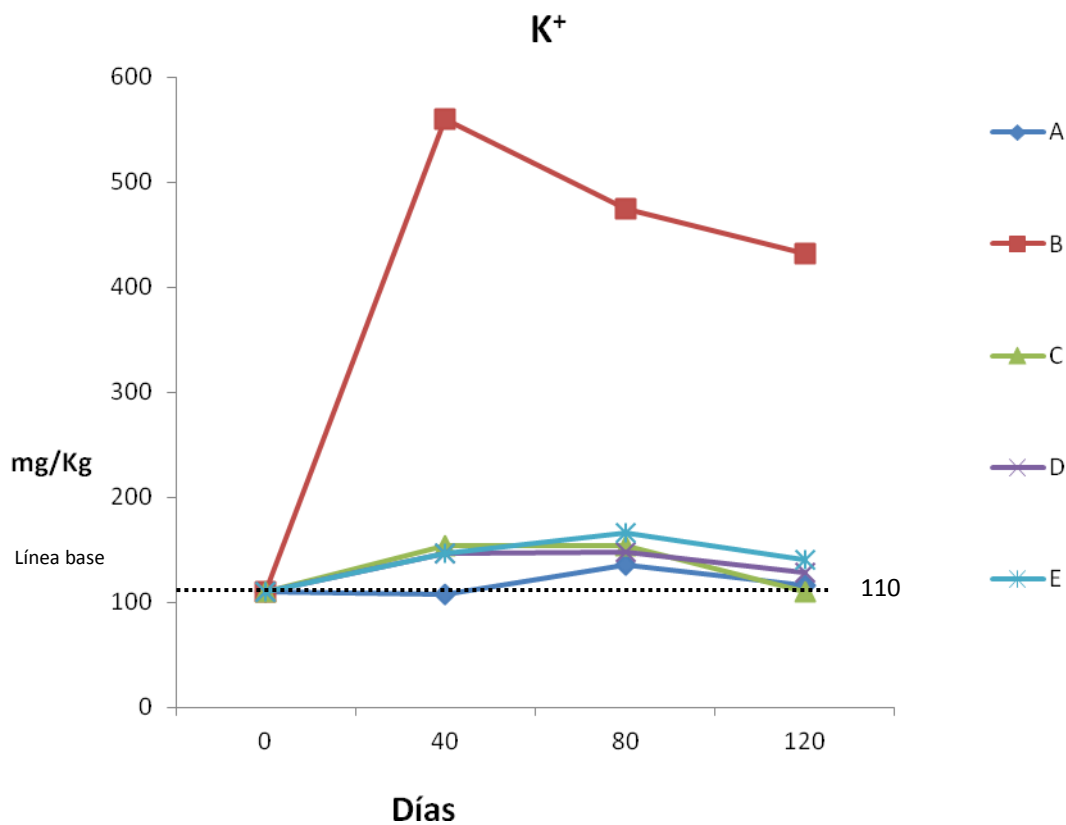


Figura 6.4. Concentración de  $K^+$  intercambiable en suelo irrigado con los diferentes tipos de agua

**Nota:** A: Agua potable, B: Agua potable con nutrientes, C: TPAO<sub>3</sub> +Filtración + (O<sub>3</sub> + NaOCl) D: TPAO<sub>3</sub> +Filtración + NaOCl, E: Agua residual cruda

En la figura 6.5, se muestra la concentración de  $\text{Ca}^{+2}$  en el suelo irrigado con diferentes tipos de agua, el comportamiento es similar en todos los casos, la concentración se incrementa a partir de los 80 días hasta llegar a niveles de 2387 mg/kg, 2632 mg/kg, 2398 mg/kg, 2502 mg/kg, 2255 mg/kg, respectivamente.

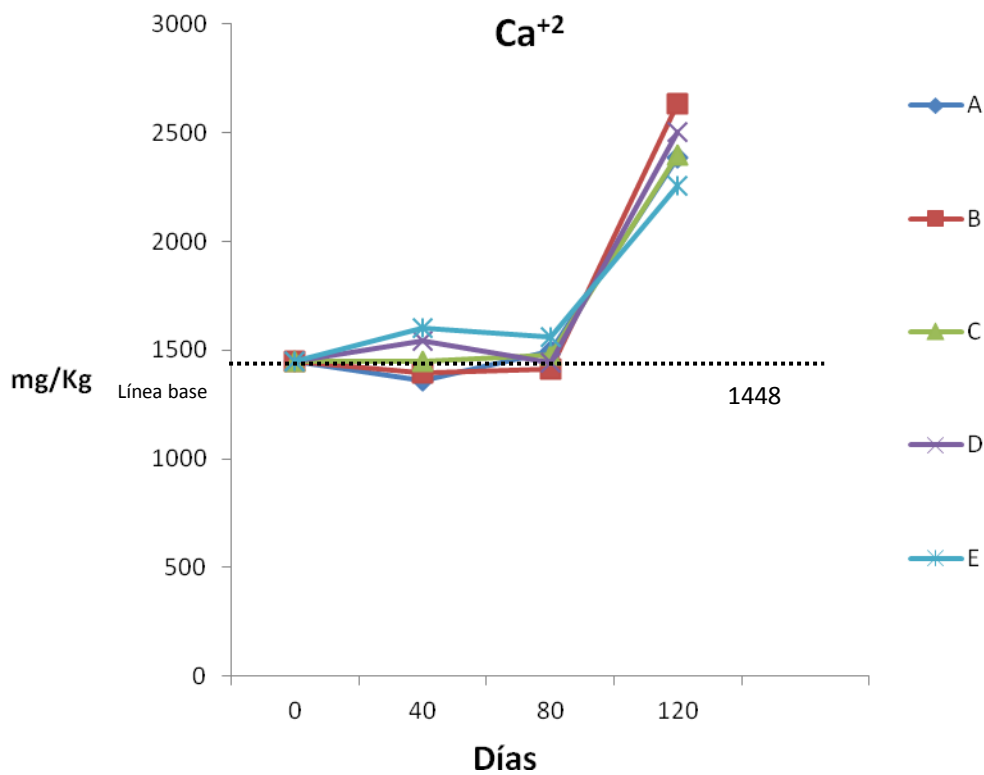


Figura 6.5. Concentración de  $\text{Ca}^{+2}$  intercambiable en suelo irrigado con los diferentes tipos de agua

**Nota:** A: Agua potable, B: Agua potable con nutrientes, C:  $\text{TPAO}_3$  +Filtración + ( $\text{O}_3$  +  $\text{NaOCl}$ ) D:  $\text{TPAO}_3$  +Filtración +  $\text{NaOCl}$ , E: Agua residual cruda

De acuerdo a la figura 6.6, al irrigar el suelo con agua potable con nutrientes (B) presentó una tendencia diferente a los demás tipos de agua, para este caso la concentración de Mg presentó a los 40 días una disminución esto se le puede atribuir a la asimilación de la lechuga a partir de los 80 días presentó una acumulación hasta quedar con una concentración de 540 mg/Kg.

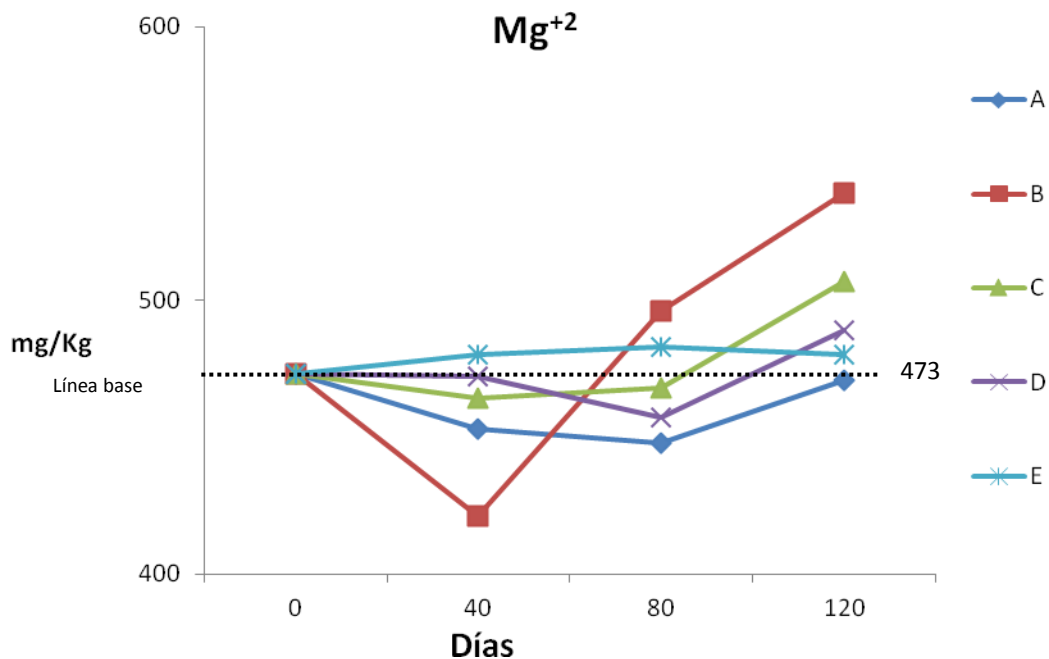


Figura 6.6. Concentración de Mg<sup>2+</sup> intercambiable en suelo irrigado con los diferentes tipos de agua

**Nota:** A: Agua potable, B: Agua potable con nutrientes, C: TPAO<sub>3</sub> +Filtración + (O<sub>3</sub> + NaOCl) D: TPAO<sub>3</sub> +Filtración + NaOCl, E: Agua residual cruda



De acuerdo a la figura 6.7, la concentración de  $\text{Na}^+$  en el suelo irrigado con el agua potable con nutrientes (B), agua residual cruda (E) y agua residual tratada (C y D), experimenta una tendencia similar, la concentración de  $\text{Na}^+$  tiende a incrementarse con el transcurso del tiempo, esto implica que hay una acumulación.

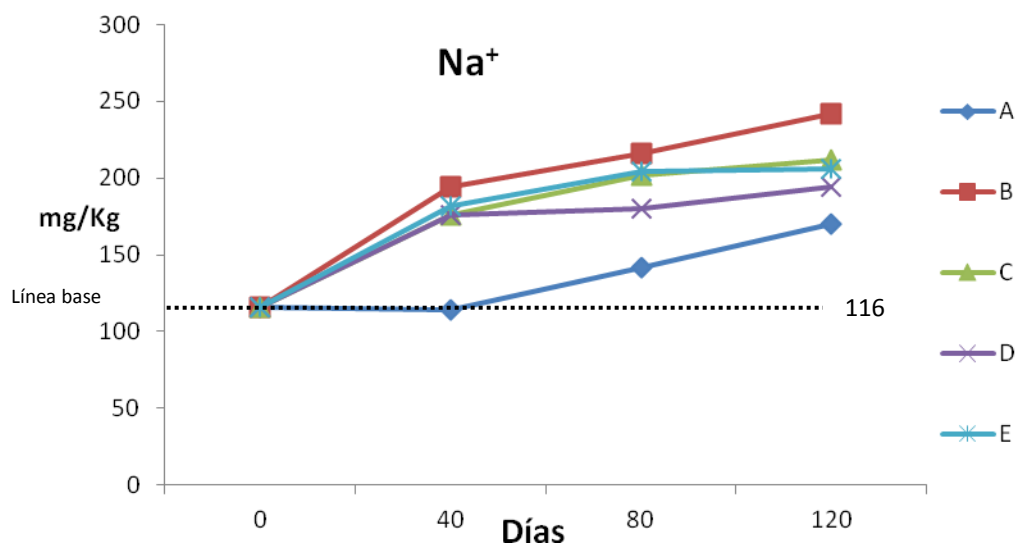


Figura 6.7. Concentración de  $\text{Na}^+$  intercambiable en suelo irrigado con los diferentes tipos de agua

**Nota:** A: Agua potable, B: Agua potable con nutrientes, C: TPAO<sub>3</sub> +Filtración + (O<sub>3</sub> + NaOCl) D: TPAO<sub>3</sub> +Filtración + NaOCl, E: Agua residual cruda

### 6.5 Determinación de pH, materia orgánica y conductividad eléctrica en suelo irrigado con los diferentes tipos de agua

En suelo irrigado con agua potable con nutrientes (B), el suelo se acidificó cambiando de un inicial de un pH de 6.60 (línea base) a un pH final de 5.52 después de 120 días del cultivo, esto implica que el suelo se va acidificando con el transcurso del tiempo y se debe en parte a la nitrificación del amonio proveniente del nitrógeno orgánico, la oxidación de sulfitos y la producción de ácidos orgánicos producto de la mineralización (Oliveira et al., 2002). Por lo tanto el uso de fertilizantes comerciales acidifica el suelo lo cual va en detrimento de las características del suelo para el cultivo.

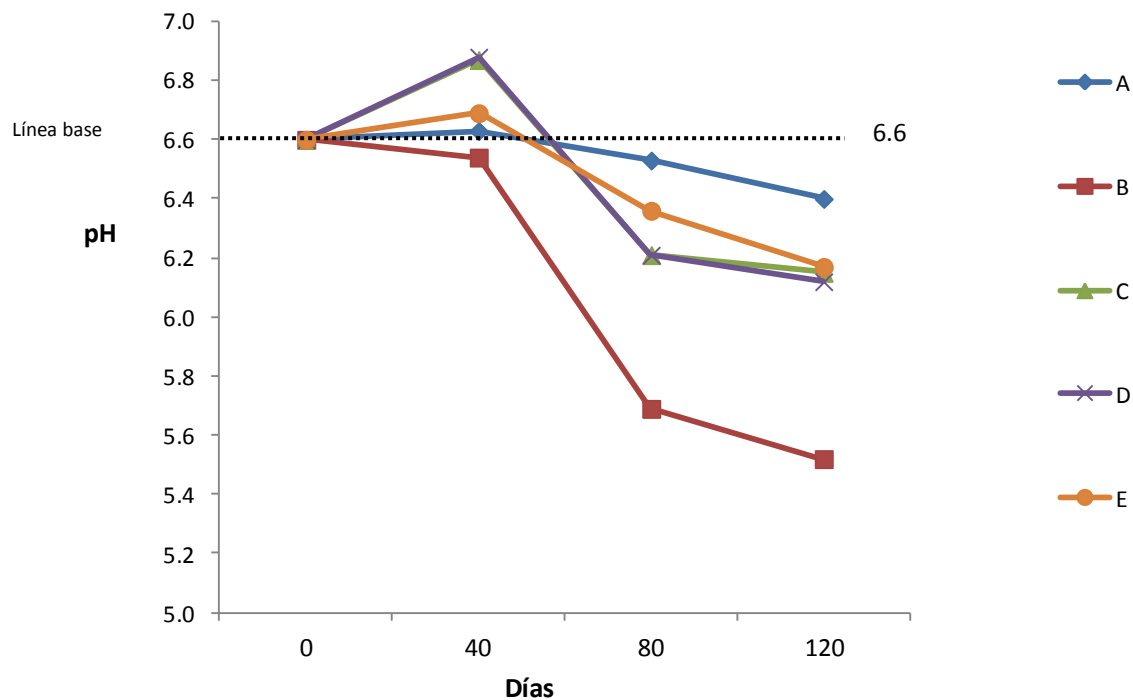


Figura 6.8. pH en suelo irrigado con los diferentes tipos de agua

**Nota:** A: Agua potable, B: Agua potable con nutrientes, C: TPAO<sub>3</sub> +Filtración + (O<sub>3</sub> + NaOCl) D: TPAO<sub>3</sub> +Filtración + NaOCl, E: Agua residual cruda

De acuerdo a la figura 6.9, el porcentaje de materia orgánica en el suelo irrigado por los diferentes tipos de agua fue incrementando con el transcurso del tiempo; el porcentaje más alto se obtuvo del suelo irrigado con agua potable con nutrientes (B) de 10.08. El incremento de materia orgánica se le atribuye en parte a los residuos vegetales y animales generados por el mismo cultivo.

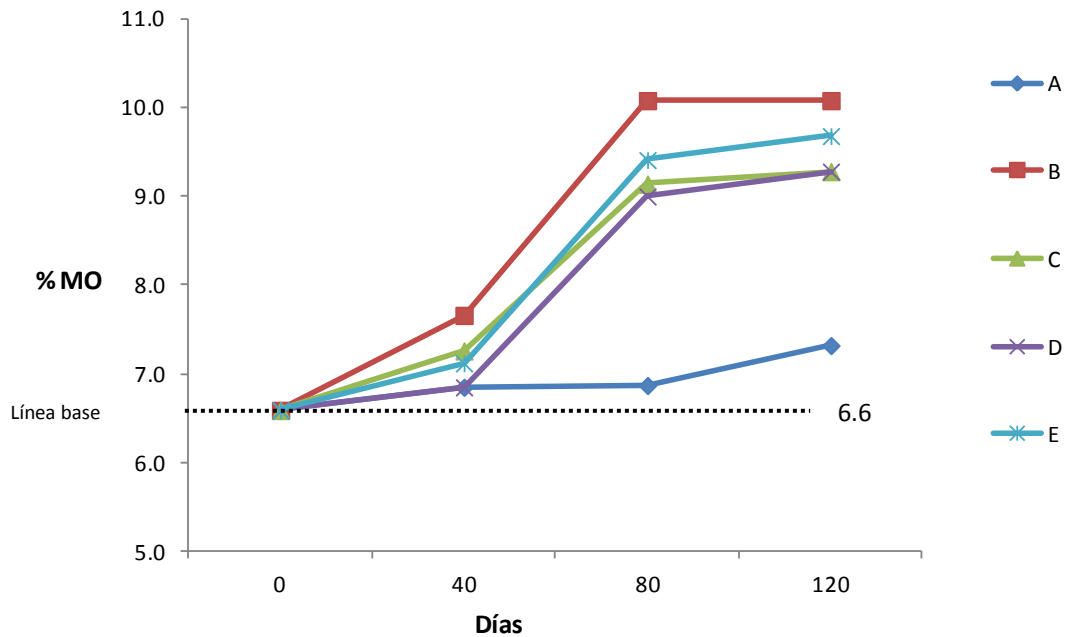


Figura 6.9. Porcentaje de materia orgánica en suelo irrigado con los diferentes tipos de agua

**Nota:** A: Agua potable, B: Agua potable con nutrientes, C: TPAO<sub>3</sub> +Filtración + (O<sub>3</sub> + NaOCl) D: TPAO<sub>3</sub> +Filtración + NaOCl, E: Agua residual cruda

En la figura 6.10, se observa que al irrigar con agua residual cruda (E) incrementa significativamente la conductividad eléctrica en comparación con los otros tipos de agua, esta es una ventaja que presenta al irrigar con el agua residual tratada.

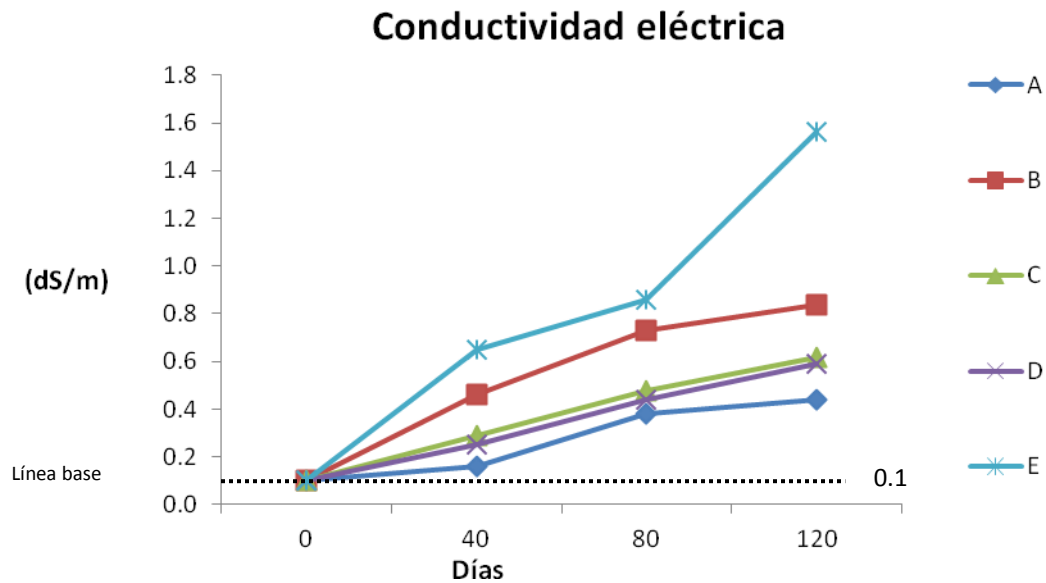
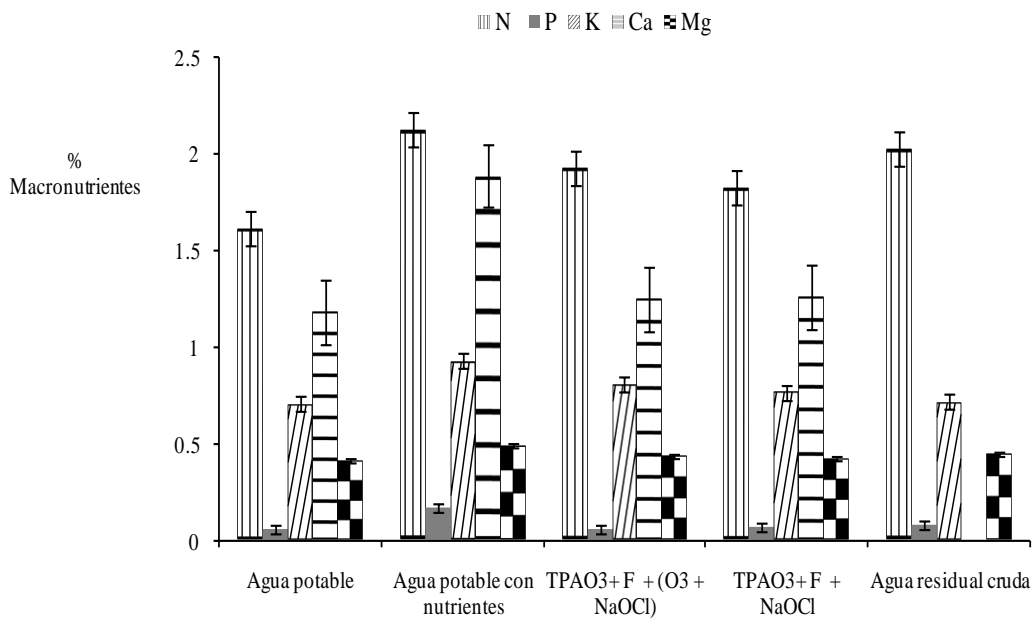


Figura 6.10. Conductividad eléctrica en suelo irrigado con los diferentes tipos de agua

**Nota:** A: Agua potable, B: Agua potable con nutrientes, C: TPAO<sub>3</sub> +Filtración + (O<sub>3</sub> + NaOCl) D: TPAO<sub>3</sub> +Filtración + NaOCl, E: Agua residual cruda

### 6.6 Determinación de macronutrientes en el tejido vegetal de lechuga italiana (*Lactuca sativa L*)

El cultivo irrigado con agua potable mas nutrientes mostró mayor contenido de N (2.13%), P (0.17%) y K (0.93%) en comparación con los otros tejidos vegetales irrigados con los diferentes tipos de agua, el contenido de Mg no muestra variaciones significativas. De acuerdo a la figura 6.11, el contenido de N y K en el tejido vegetal irrigado con agua residual cruda y agua residual tratada tampoco muestran diferencias marcadas, eso indica que hay una ventaja al irrigar con aguas residuales tratadas ya que puede aportar nutrientes al suelo de manera segura, los cuales pueden ser aprovechados por el cultivo de la lechuga Italiana (*Lactuca sativa L*)



**Figura 6.11** Contenido de macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg) en el tejido vegetal de lechuga irrigado con los diferentes tipos de agua

6.7 Peso y longitud de la lechuga italiana (*Lactuca sativa L*)

De acuerdo a la figura 6.12, el agua potable con nutrientes supera a los demás tipos de agua en cuanto a la producción de lechugas de mayor peso. Las lechugas con menor peso fueron las producidas con agua residual cruda y potable.

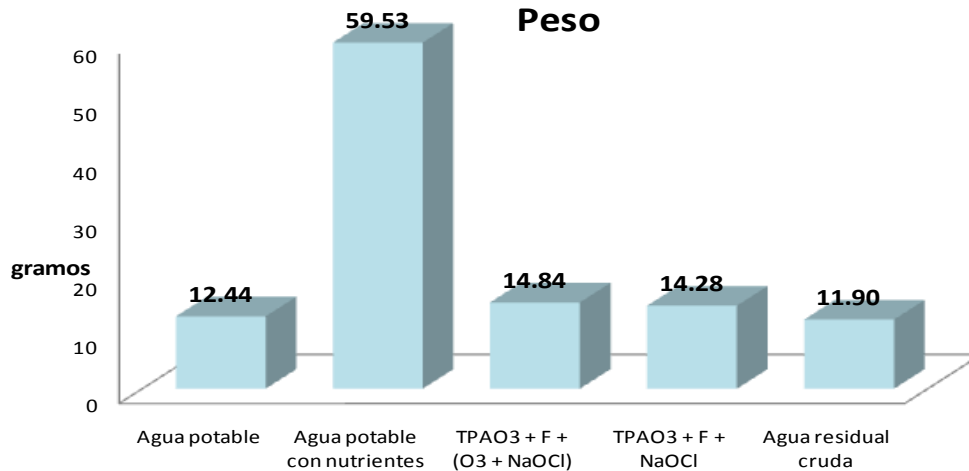


Figura 6.12 Peso de la lechuga irrigada con los diferentes tipos de agua

De acuerdo a la figura 6.13, las lechugas que presentaron mayor talla fueron las irrigadas con agua potable con nutrientes. Las lechugas con menor longitud fueron las irrigadas con agua residual cruda, esto se le atribuye a que estas lechugas fueron las primeras en presentar plagas principalmente de pulgones, gusano verde y mosca blanca. Estos datos indican que al irrigar con agua tratada presenta ventajas comparada con el agua residual cruda.

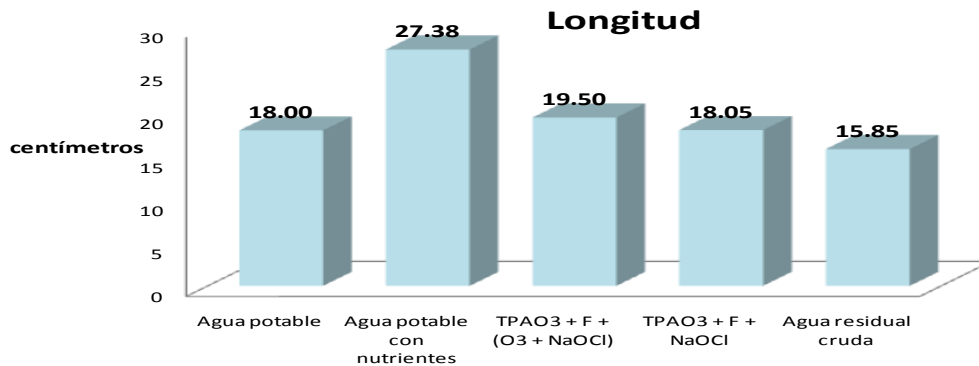


Figura 6.13. Longitud de la lechuga irrigada con los diferentes tipos de agua

### 6.8 Balance de macronutrientes en el sistema agua, suelo y cultivo

Al realizar el balance con agua potable, la concentración de N, P, K en el agua presenta una concentración baja de 0.20 mg/L, 0.68 mg/L, 5.19 mg/L respectivamente; esto implica que este tipo de agua no aporta al suelo nutrientes en concentración suficiente, por lo tanto el tejido vegetal asimila principalmente lo que contiene de manera natural el suelo, de ahí que no se observa una acumulación. La concentración de Ca y Mg experimenta una ligera acumulación en el suelo como se observa en la tabla 6.4

Tabla 6.4 Balance de macronutrientes en el sistema con agua potable

Agua Potable					Entrada			Salida		
Nutriente	Agua mg/L	Suelo inicial mg/kg	Suelo final mg/kg	Tejido vegetal mg/kg	A (mg)	B (mg)	A+B (mg)	C (mg)	D (mg)	C+D (mg)
<b>N</b>	0.20	18.71	0.20	16200	2.75	1403.25	1406.00	12.00	141.75	153.75
<b>P</b>	0.68	11.02	7.79	600	9.35	826.50	835.85	467.40	5.25	472.65
<b>K</b>	5.19	110.00	116.00	7100	71.36	8250.00	8321.36	6960.00	62.13	7022.13
<b>Ca</b>	21.72	1448.00	2632.00	11800	298.65	108600.00	108898.65	157920.00	103.25	158023.25
<b>Mg</b>	20.09	473.00	539.00	4200	276.24	35475.00	35751.24	32340.00	36.75	32376.75

El balance de nutrientes indica que cuando se emplea agua potable con nutrientes, la concentración de N, K y Ca se va acumulando en el suelo con 21300 mg/kg, 1700 mg/kg y 2398 mg/kg; por lo tanto el valor de salida es mayor que el de entrada. En el caso de P y Mg la concentración en el agua es baja de 11.49 mg/L y, 25.40 mg/L respectivamente, por lo tanto el tejido vegetal asimila lo que tiene el suelo inicial y lo que se va irrigando sin acumularse en el suelo, ver tabla 6.5

Tabla 6.5 Balance de macronutrientes en el sistema con agua potable con nutrientes

Agua Potable con nutrientes					Entrada			Salida		
Nutriente	Agua mg/L	Suelo inicial mg/kg	Suelo final mg/kg	Tejido vegetal mg/kg	A (mg)	B (mg)	A+B (mg)	C (mg)	D (mg)	C+D (mg)
<b>N</b>	79.73	18.71	132.41	21300	1096.29	1403.25	2499.54	7944.60	186.38	8130.98
<b>P</b>	11.49	11.02	10.60	1700	157.99	826.50	984.49	636.00	14.88	650.88
<b>K</b>	147.90	110.00	432.00	9300	2033.63	8250.00	10283.63	25920.00	81.38	26001.38
<b>Ca</b>	24.31	1448.00	2398.00	18900	334.26	108600.00	108934.26	143880.00	20.98	143900.98
<b>Mg</b>	25.40	473.00	471.00	4900	349.25	35475.00	35824.25	28260.00	42.88	28302.88



El balance de nutrientes donde se emplea agua residual tratada con TPAO<sub>3</sub> + Filtración + Desinfección con (O<sub>3</sub> + NaOCl) la concentración de agua en N, Ca y Mg 24.41 mg/L, 27.85 mg/L y 18.95 mg/L respectivamente al irrigar el suelo la concentración se va acumulando, en el caso del N el valor de la salida es mayor que el de la entrada. La concentración P no es suficiente para aportar en el suelo y el tejido vegetal sólo asimila lo que contiene el suelo y por lo tanto la concentración de suelo disminuye con respecto al suelo inicial. En el caso de la concentración del K, lo que aporta el agua es lo que asimila la planta conservando una concentración de suelo de 110 mg/kg, ver tabla 6.6

Tabla 6.6 Balance de macronutrientes en el sistema con TPAO<sub>3</sub> + F + (O<sub>3</sub> + NaOCl)

TPAO <sub>3</sub> + F + (O <sub>3</sub> + NaOCl)					Entrada			Salida		
Nutriente	Agua mg/L	Suelo inicial mg/kg	Suelo final mg/kg	Tejido vegetal mg/kg	A (mg)	B (mg)	A+B (mg)	C (mg)	D (mg)	C+D (mg)
N	24.41	18.71	186.40	18300	335.64	1403.25	1738.89	11184.00	160.13	11344.13
P	4.87	11.02	7.06	600	66.96	826.50	893.46	423.60	5.25	428.85
K	14.58	110.00	110.00	8100	200.48	8250.00	8450.48	6600.00	70.88	6670.88
Ca	27.85	1448.00	2387.00	12500	382.94	108600.00	108982.94	143220.00	109.38	143329.38
Mg	18.95	473.00	507.00	4400	260.56	35475.00	35735.56	30420.00	38.50	30458.50

Al realizar el balance, en donde se emplea agua residual tratada con  $\text{TPAO}_3$  + Filtración + Desinfección con  $\text{NaOCl}$  la concentración de agua en Ca y Mg 27.11 mg/L y 18.19 mg/L respectivamente al irrigar el suelo la concentración se va acumulando. En el caso de la concentración de N en el suelo tiene pérdidas, esto se le puede atribuir a un error experimental en la determinación. La concentración de P no es suficiente para aporta al suelo y el tejido vegetal sólo asimila lo que contiene el suelo y por lo tanto la concentración de suelo disminuye al final. La concentración de K en el suelo se acumuló ligeramente de 110 mg/kg a 128 mg/kg, ver tabla 6.7

Tabla 6.7 Balance de macronutrientes en el sistema con  $\text{TPAO}_3$  + F +  $\text{NaOCl}$

TPAO <sub>3</sub> + F + NaOCl					Entrada			Salida		
Nutriente	Agua mg/L	Suelo inicial mg/kg	Suelo final mg/kg	Tejido vegetal mg/kg	A (mg)	B (mg)	A+B (mg)	C (mg)	D (mg)	C+D (mg)
<b>N</b>	27.81	18.71	0.20	19300	382.39	1403.25	1785.64	12.00	168.88	180.88
<b>P</b>	4.38	11.02	8.89	700	60.23	826.50	886.73	533.40	6.13	539.53
<b>K</b>	12.05	110.00	128.00	7700	165.69	8250.00	8415.69	7680.00	67.38	7747.38
<b>Ca</b>	27.11	1448.00	2502.00	12800	372.76	108600.00	108972.76	150120.00	112.00	150232.00
<b>Mg</b>	18.19	473.00	489.00	4300	250.11	35475.00	35725.11	29340.00	37.63	29377.63

De acuerdo al balance de nutrientes, en donde se emplea agua residual cruda la concentración de agua en N y Ca (27.62 mg/L y 29.43 mg/L) respectivamente al irrigar el suelo la concentración se va acumulando y obteniendo valores mayores en la salida (1842.03 mg, 135410.25 mg) respectivamente en comparación con los de la entrada. La concentración de P no es suficiente para aportar al suelo y el tejido vegetal sólo asimila lo que contiene el suelo y por lo tanto la concentración de P en el suelo disminuye al final. En el caso de la concentración del Mg hay una ligera acumulación En el caso de la concentración del K hay una ligera acumulación y casi un balance exacto con un valor de salida ligeramente mayor que la entrada, ver tabla 6.8

Tabla 6.8 Balance de macronutrientes en el sistema con agua residual cruda

Agua residual cruda					Entrada			Salida		
Nutriente	Agua mg/L	Suelo inicial mg/kg	Suelo final mg/kg	Tejido vegetal mg/kg	A (mg)	B (mg)	A+B (mg)	C (mg)	D (mg)	C+D (mg)
<b>N</b>	27.62	18.71	27.74	20300	379.78	1403.25	1783.03	1664.40	177.63	1842.03
<b>P</b>	9.50	11.02	7.30	800	130.63	826.50	957.13	438.00	7.00	445.00
<b>K</b>	13.39	110.00	140.00	7200	184.11	8250.00	8434.11	8400.00	63.00	8463.00
<b>Ca</b>	29.43	1448.00	2255.00	12600	404.66	108600.00	109004.66	135300.00	110.25	135410.25
<b>Mg</b>	19.42	473.00	480.00	4500	267.03	35475.00	35742.03	28800.00	39.38	28839.38

## CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES

Para esta investigación se concluye lo siguiente:

1. Al caracterizar el suelo, antes de ser irrigado por los diferentes tipos de agua, la concentración de P, Mg y Ca es baja. Sin embargo, la concentración es media de N y K de acuerdo con las propiedades de fertilidad que debe contar un suelo (NOM-021-SEMARNAT-2000). Así también, el suelo presenta alto porcentaje de materia orgánica lo cual es importante para la retención de humedad.
2. Que el contenido de macronutrientes en el agua residual tratada, no presenta variaciones importantes. Por lo tanto, el sistema aplicado de tratamiento no afecta el contenido de nutrientes, lo que significa que el agua tratada mantiene además de que cumple con la calidad microbiológica requerida, e implica que existe más disponibilidad de estos nutrientes en el suelo que pueden contribuir a mejorar la productividad de los cultivos.
3. Que en cuanto al balance de masa en el sistema agua, suelo y cultivo la concentración de Ca y Mg, en todos los tipos de agua que se emplearon hay una acumulación en el suelo; en el caso de la concentración del P hay pérdidas en el suelo final debido a la baja concentración inicial en los diferentes tipos de agua; la concentración de K permaneció casi constante. Al comparar el agua potable con nutrientes y agua residual tratada la concentración de N en el suelo presenta una acumulación en ambos casos, lo que significa que adicionan nutrientes al igual que una agua potable a la que se le añadió fertilizante comercial.
4. Que al evaluar el efecto de los diferentes tipos de agua de riego en el contenido de macronutrientes en el suelo y tejido vegetal, el cultivo irrigado con agua potable con nutrientes mostró mayor contenido de P con un 64.70% en comparación con el agua residual tratada. El contenido de N y K en el cultivo irrigado con agua residual cruda y TPAO<sub>3</sub> + F + Desinfección no hay variaciones, lo que indica que es una ventaja irrigar con aguas residuales tratadas, ya que el contenido nutricional se conserva en la lechuga italiana (*Lactuca sativa L*).
5. De acuerdo a la hipótesis que se propuso en este trabajo el agua residual tratada sí aportó al suelo los macronutrientes necesarios suelo para el crecimiento del cultivo lechuga (*Lactuca sativa L*).

## BIBLIOGRAFÍA

Adrover, M., Farrús E., Moyá G., Vadell J., (2010), Chemical properties and biological activity in soils of Mallorca following twenty years of treated wastewater irrigation. *Journal Environmental. Management.*, pp 1-5.

Alzate J.F y Loaiza L.F., (2008) Colinagro Inteligencia en agroproducción “Monografía del cultivo de la lechuga” Bogotá Colombia pp 6-10.

APHA. AWWA. WPCE. Standard methods for the examination of water and wastewater, 19 th Ed. Washington D.C. 1995 and (1992)

Bianco, V., (1990) Lattuga ( *Lactuca sativa* L.). En: Orticoltura. Ed.: Patron, Bologna, Italia. pp 270-319.

Bindraban, P.S., Stoorvogel, J.J., Cansen, D.M., Vlaming, J., Groot, J.J.R., (2000). Land quality indicators for sustainable land management: proposed method for yield gap and soil nutrient balance. *Agric. Ecosys. Environ.*, 81: pp103-112.

Briones M., (2007) “Guía práctica para la exportación de lechuga a los Estados Unidos” Instituto Internacional de Cooperación para la Agricultura Representación del IICA en Nicaragua pp 1-11.

Buckman Harry., (1991). Naturaleza y propiedades de los suelos. Editorial Limusa, S.A de C.V. pp 21 y 426-427.

Campos A.E.-Reales-Pineda, Orta de Velásquez M.T. and Rojas Valencia M.N., (2008). The use of Ozone during APT of wastewater for its reuse in agriculture: an approach to enhance coagulation, disinfection and crop productivities. *Water Science & Technology*, 57 (6), pp 955-962.

Carrasco, L. And Turner, C.H.D., (2006). Evaluation de disinfection techniques in the treatment of Advanced Primary Treated wastewater for Ciudad Juárez, México. *Water Environmental*, Vol.78, pp 49-58.

Chávez, A., Jimenez, B. and Maya C., (2004). Particle size distribution as a useful tool for microbial detection. *Water Science & Technology*, 50(2), pp 179-186.

Chávez A., Maya C., Jiménez B., (2006). Particle size distribution to design and operate an APT process for agricultural wastewater reuse. *Water Science & Technology*, 53(7), pp 43-49.

Collis G., Davey B., (1971). Fundamentos de agricultura moderna; suelo, atmósfera y fertilizantes, pp 334.

Donahue R., (1981). Introducción a los suelos y al crecimiento de las plantas. Editorial. Prentice may Internacional, Colombia.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua en los cultivos*. Riego y Drenaje 56, Roma, 2006

Fernández E., Cabrera F., Madejón E., Díaz M., Moreno F and Calero J., (1998) Analysis of cations drainage water and soil solution by single-column ion chromatography. *Journal of Chromatography A*, Vol. 823, pp 279-283.

FitzPatrick E.A., (1996). Introducción a la ciencia de los suelos. Editorial Trillas, pp 157-164.

Gehr, R., Wagner, M., Veerasubramanian, P. and Payment, P., (2003). Disinfection efficiency of peracetic acid, UV and ozone after enhanced primary treatment of municipal wastewater. *Water Research*, Vol. 37, pp 4573-4586.

Granstedt, A., (1999a). Case studies on the flow and supply of nitrogen in alternative farming in Sweden. 1. Skilleby farm 1981-1987. *Biol. Agric. Hort.*, 9 : 15-63.

Guzmán, M., (2004). Manual de fertilizantes para cultivos de alto rendimiento, México: Limusa, pp 87-99.

Heidarpour M., Mostafazadeh-Fard B., Abeid Koupai J., and Malekian R., (2007). The effects of treated wastewater on soil chemical properties using subsurface and surface irrigation methods. *Agricultural Water Management*, Vol. 90, pp 87-94.

Herpin U., Gloaguen T.V, Ferreira da Fonseca A., Montes C., Campos F., Pasos R and Breulman G., (2007). Chemical effects on the soil-plant system in a secondary treated wastewater irrigated coffee plantation field study in Brazil. *Agricultural Water Management*, Vol. 89 , pp 105-115.

Ho Lee, B., Chul Song, W., Manna, B., Kyu Ha, J., (2008). Dissolved ozone flotation (DOF)- a promising technology in municipal wastewater treatment. *Desalination*, Vol. 225, pp 260-273.

Isea D., Bello n., Vargas L., Durán J., Yabroudi S y Delgado j., (2004). Acumulación y lixiviación de metales macronutrientes en suelos irrigados con aguas residuales tratadas. *Interciencia*, Vol. 29 No.012, Caracas, Venezuela, pp 660-666.

Jiménez B., Chavez A and Hernández C., (1999). Alternative treatment for wastewater destined for agricultural use. *Water Science Technology*, 40 (4-5), pp 355-362.

Jiménez B., Chávez A. and Leyva A., (1999). Sand and synthetic médium filtration of advanced primary treatment effluent from Mexico city. *Water Science Technology*, 34 (2), pp 473-480.

Jiménez Cisneros B., (1996). Waterwater reuse to increase soil productivity. *Water Science Technology*, 32 (12), pp 173-180.

Jiménez Cisneros Blanca., (2001) “La Contaminación Ambiental en México” LIMUSA NORIEGA EDITORES. pp 238.

Kalavrouziotis I.K., Robolas P., Koukoulakis P.H., Papadopoulos A.H., (2008). Effects of municipal reclaimed wastewater on the macro-and micro-elements status of soil and of Brassica oleracea var. Italica, and B. oleracea var. Gemmifera . *Agricultural Water Management*, Vol.95, pp 419-426.

Keime, M.P., (2002). Esquema innovador para el tratamiento de agua negras y su reúso en México. XXVIII Congreso Internacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Cancún. México, 27 al 31 de Octubre, pp. 1-7

Kiziloglu F.M.,Turan M., Sahin U., Kuslu Y., Dursun A., (2008). Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (Brassica oleracea L. var. botrytis) and red cabbage (Brassica oleracea L. var. rubra) grown on calcareous soil in Turkey. *Agricultural Water Management*, Vol.95, pp 716-724.

Liberti L., Notarnicola M. and Lopez A., (1999). Advanced Treatment For Municipal Wastewater Reuse In Agriculture. Ozone Disinfection. *Ozone Science & Engineering*, Vol.22, pp 151-166.

Lu H.J, Ye Z.Q, Zhang X.L, Lin X.Y and Ni W.Z., (2011). Growth and yield responses of crops and macronutrient balance influenced by commercial organic manure used as a partial substitute for chemical fertilizers in an intensive vegetable cropping system. *Physics and Chemistry of the Earth* Vol. 36, pp 387-394.

Martínez J.F., (2009). Contenido de N, P, Ca, Mg y K en especies arbóreas de bosques templados y calidad del suelo en la sierra de Manantlán y la Sierra de Juárez, Tesis para obtener el Título de Biólogo. UNAM, FES ZARAGOZA, pp 5.

Munir j., Rusan M., Hinnawi S., Rousan L., (2007). Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and quality parameters. *Desalination* Vol. 215, pp 143-452.

Navarro, G. (2003)., *Química Agrícola*, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid 2003, 2, 104-107.

NOM-001-SEMARNAT-1996. “Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales”.

NOM-021-SEMARNAT-2000 “Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis”

Ohashi, K., Yoshi, M., Isobe, T., Park, J., Kurata, K and Fujiwara K., (2009). Nutrient Solution Prepared with Ozonated Water does not Damage Early Growth of Hydroponically Grown Tomatoes. *Ozone: Science & Engineering*, Vol.31, pp 21-27.

Oliveira, F., Matiazzo, M., Marciano, C. and Rosseto, R., (2002). Efeitos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto em Latossolo Amarelo distrófico com cana-de-açúcar: carbono orgânico, condutividade eléctrica, pH e CTC. *Rev. Bras. Cien. Solo*, **26** (2), 505-519.

Orta de Velásquez, M.T., Altamirano-Coro, J.M., Monje-Ramírez, I., Manero-Brito, O., (1998). Improvement of Wastewater Coagulation Using Ozone. *Ozone: Science and Engineering*, 20, 151-162.

Orta de Velásquez, M.T., Rojas-Valencia, M.N, Campos-Reales-Pineda, A.E., (2006). Evaluation of phytotoxic elements, trace elements and nutrients in a standardized crop plant, irrigated with raw wastewater treated by APT and ozone. *Water Science & Technology*, 54(11-12), pp 165-173.

Orta de Velásquez, Ma. T, Yáñez-Noguez I, Jiménez Cisneros B, and Luna Pabello V.M., (2008). Adding silver and copper to hydrogen peroxide and peracetic acid in the disinfection of an advanced primary treatment effluent. *Environmental Technology*, Vol. 29, pp 1209-1217.

Pedrero, F., Kalavrouziotis, I., Alarcón, J.J., Koukolakis, P. and Asano T. (2010), Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture—Review of some practices in Spain and Greece. *Agric. Water Manage.*, **97**, 1233-1241.

Pérez Calvo M<sup>a</sup>. del Mar., (2006). Tratamiento avanzado de aguas residuales para riego mediante oxidación con ozono: una alternativa ecológica.

Raub L., Amrhein C and Matsumoto M., (2000). The effects of Ozonated Irrigation Water on Soil Physical and Chemical. *Ozone Science & Engineering*, Vol. 23, pp 65-76.

Ribó Herrero Marta., (2004) “Balance de macronutrientes y materia orgánica en el suelo de agrosistemas hortícolas con manejo integrado ecológico” pp 52-53.

Rice, G., (2002). Ozono ¿De que se trata?. Organización Internacional del Ozono, conferencia regional, México 2002, RICE International Consulting Enterprises, pp 37.

Rodríguez, F., (2003). Proceso de potabilización del agua e influencia del tratamiento de ozonización. Edición Díaz de Santos, S.A. Madrid España. pp 34-37.

Rojas-Valencia, Orta de Velásquez, Vaca-Mier M and Franco., (2004). Ozonation by-products issued from the destruction of microorganisms present in wastewaters treated for reuse. *Water Science and Technology* Vol.50 No.2 pp 187-193.

Sánchez Orozco Mario., (1993). Química del suelo, Editorial Limusa, S.A. de C.V. Grupo Noriega editores, pp 15, 156 y 249.



Seoáñez Calvo Mariano., (1999). Contaminación de suelo estudios tratamiento y gestión. Edición Mundi-Prensa. Madrid España, pp 37-38.

Shao, Y.J., Lui, A., Wada, F., Crosse, J. and Jenkins, D., (2006). Advanced Primary Treatment: An alternative to biological secondary treatment. The City of Los Angeles Hyperion Treatment Plant experience *Water Science & Technology*, Vol. 34, pp 223-233.

Simonete, M., J. Kiehl y T. Andrade., (2003). Efeito do lodo de esgoto em um Argissolo e no crescimento e nutrição de milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 38(10): 1187-1195.

Smaling, E.M.A., Stoorvogel, J.J., Jansen, D.M., (1993). Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales. *II District scale. Fertil. Res.*, 35: 237-250.

Thompson, L., (1980). Los suelos y su fertilidad, Cuarta Edición, Editorial Reverté, S.A, pp 15-17.

Toze, S., (2006). Reuse of effluent water—benefits and risks. *Agric. Water Manage.* 80, 147–159.

Turk, L.M., (1971). Fundamentos de la Ciencia del Suelo, Editorial Continental, S.A, primera edición en español, pp 325-352.

Váldez López Velia Fabiola; (2011). Efecto del pH de reacción en el desempeño de un Tratamiento Primario Avanzado (TPA) y un TPA mejorado con ozono (TPAO<sub>3</sub>) para el reúso de agua residual en la agricultura. Tesis Profesional para obtener el título de Ingeniería Química, Directora de tesis: Dra. Ma. Teresa Orta Ledesma, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de química.

ANEXOS

A1. Fotos del tratamiento de agua residual tratada



Figura 1. Cuarto de ozonación



Figura 2. Generador de Ozono



Figura 3. Analizador de ozono en fase gas



Figura 4. Destructor de Ozono



Figura 5. TPAO<sub>3</sub> + O<sub>3</sub>



Figura 6. Sedimentación

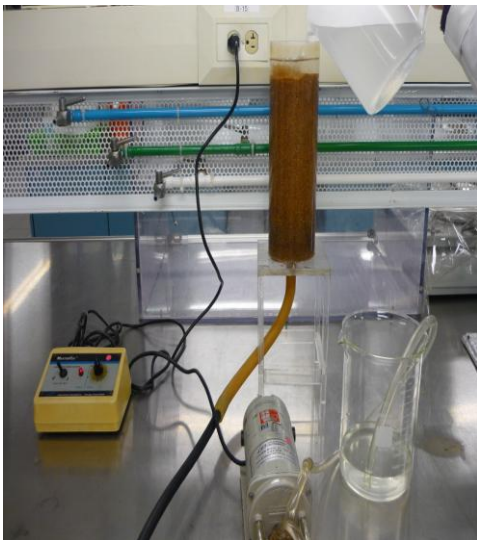


Figura 7. Filtración

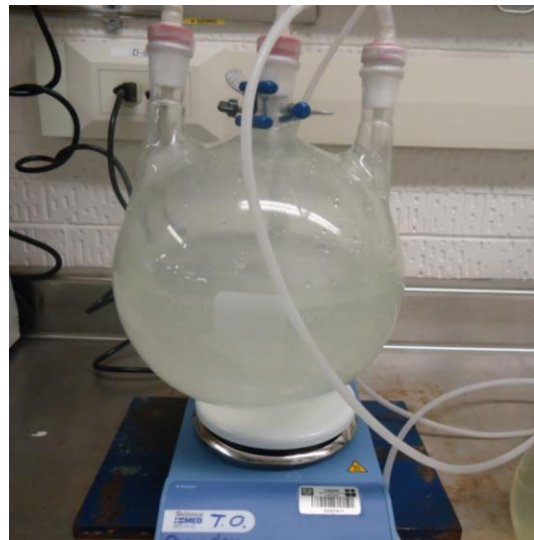


Figura 8. Desinfección



Figura 9. Efluente



## A2. Fotos del cultivo lechuga italiana (*Lactuca sativa L*) en el Invernadero

### Fotos en la plantación de la lechuga



Figura 10. Lechugas irrigadas con AP, TPAO<sub>3</sub> + F + (O<sub>3</sub>+NaOCl), AP + N



Figura 11. Lechugas irrigadas con AP, TPAO<sub>3</sub> + F + NaOCl, AP + N



Figura 12. Lechugas irrigadas con TPAO<sub>3</sub> + F + NaOCl, AP + N



Figura 13. Lechugas irrigadas con AR y AP



Figura 14. Lechugas irrigadas con AR



Figura 15. Desarrollo de la lechuga





Figura 16. Desarrollo de la lechuga



Figura 17. Desarrollo de la lechuga



Figura 18 .Desarrollo de la lechuga





Figura 19 .Desarrollo de la lechuga



Figura 20 .Desarrollo de la lechuga

## Daños ocasionados por las plagas



Figura 21. Daños ocasionados por plaga (gusano verde)

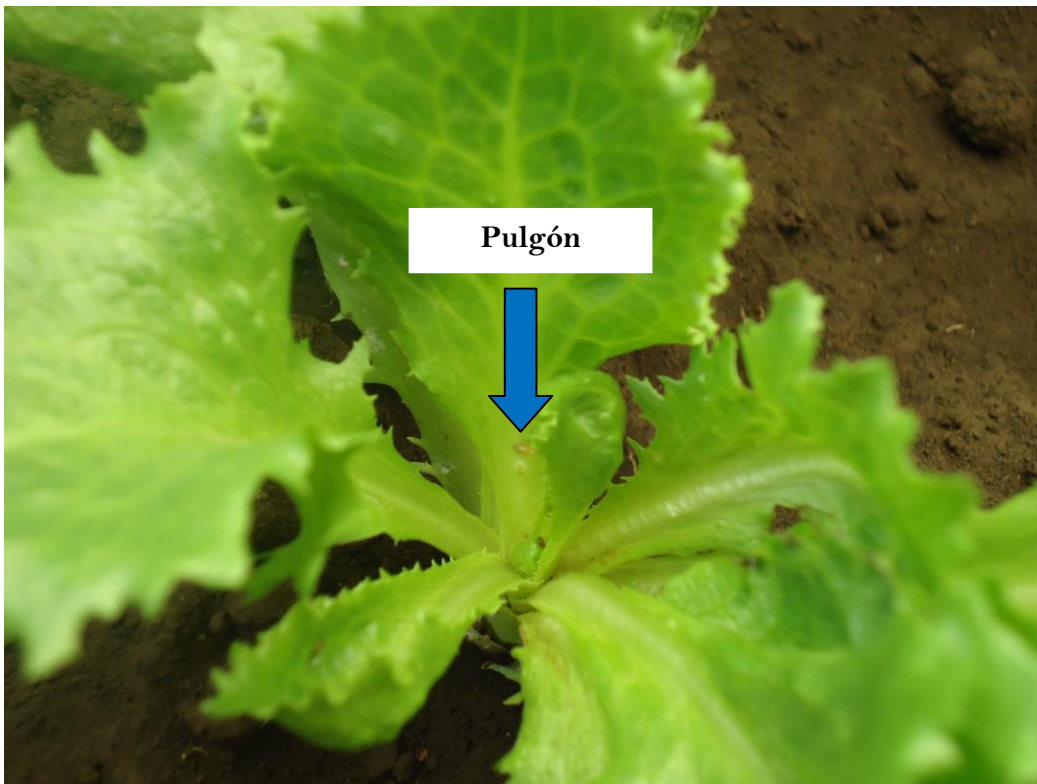


Figura 22. Plaga (pulgón)



## Cosecha de lechuga



Figura 23. Lechugas irrigadas con AP,  $\text{TPAO}_3 + \text{F} + (\text{O}_3 + \text{NaOCl})$ , AP + N



Figura 24. Lechugas irrigadas con AP + N,  $\text{TPAO}_3 + \text{F} + \text{NaOCl}$



Figura 25. . Lechugas irrigadas con AR



Figura 26. Lechugas irrigadas con AP + N



Figura 27. Recolección de lechuga

A3. Especificaciones de fertilidad de acuerdo la NOM-021-SEMARNAT-2000

Materia orgánica (%)	Clase
<0.5	Muy bajo
0.6-1.5	Bajo
1.6-3.5	Medio
3.6-6.0	Alto
>6.0	Muy alto

N inorgánico en el suelo (mgkg <sup>-1</sup> )	Clase
0-10	Muy bajo
0-20	Bajo
20-40	Medio
40-60	Alto
>60	Muy alto

P Bray y Kurtz 1 (mgkg <sup>-1</sup> )	Clase
<15	Muy bajo
15-30	Bajo
>30	Medio

CIC (cmolkg <sup>-1</sup> )	Clase
>40	Muy alta
25-40	Alta
15-25	Media
5-15	Baja
>5	Muy baja

Ca (cmolkg <sup>-1</sup> )	K (cmolkg <sup>-1</sup> )	Mg (cmolkg <sup>-1</sup> )	Clase
-2	-0.2	-0.5	Muy baja
2-5	0.2-0.3	0.5-1.3	Baja
5-10	0.3-0.6	1.3-3.0	Media
Mayor a 10	Mayor a 0.6	Mayor a 3.0	Alta

<b>CE dS m<sup>-1</sup> a 25°C</b>	<b>Efectos</b>
<1.0	Efectos despreciables de la salinidad
1.1-2.0	Muy ligeramente salino
2.1-4.0	Moderadamente salino
4.1-8.0	Suelo salino
8.1-16.0	Fuertemente salino
>16.0	Muy fuertemente salino