



---

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

DISEÑO DE UN SISTEMA DE  
DESINFECCIÓN CON OZONO DE AGUA  
PARA RIEGO AGRÍCOLA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
Ingeniero Químico

PRESENTA  
Andrés Alejandro Prado Martínez



Ciudad Universitaria, CD. MX., 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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: Prof. Luz María Lazcano Arriola  
VOCAL: Prof. José Agustín García Reynoso  
SECRETARIO: Prof. María Teresa Orta Ledesma  
1<sup>er</sup> SUPLENTE: Prof. Sergio Adrián García González  
2<sup>do</sup> SUPLENTE: Prof. Alejandra Mendoza Campos

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Laboratorio de Ingeniería Ambiental, Instituto de Ingeniería, UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

---

Dra. María Teresa Orta Ledesma

SUSTENTANTE:

---

Andrés Alejandro Prado Martínez

## CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS .....	5
ÍNDICE DE FIGURAS .....	6
RESUMEN .....	7
1. INTRODUCCIÓN .....	8
2. OBJETIVOS .....	10
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	10
2.2 OBJETIVOS PARTICULARES.....	10
3. MARCO TEÓRICO.....	11
3.1 RIEGO AGRÍCOLA .....	11
3.1.1 MÉTODOS DE RIEGO .....	11
3.2 CALIDAD DEL AGUA PARA EL RIEGO AGRÍCOLA .....	14
3.2.1 CALIDAD QUÍMICA DEL AGUA PARA RIEGO AGRÍCOLA .....	16
3.2.2 CALIDAD FÍSICA DEL AGUA DE RIEGO .....	17
3.2.3 CALIDAD MICROBIOLÓGICA DEL AGUA DE RIEGO .....	17
3.3 FILTRACIÓN.....	20
3.3.1 APLICACIONES .....	21
3.3.2 IMPORTANCIA DE LA FILTRACIÓN EN LOS SISTEMAS DE RIEGO .....	22
3.3.3 FILTROS MÁS COMUNES PARA SISTEMAS DE RIEGO .....	24
3.3.4 SELECCIÓN DEL FILTRO .....	30
3.4 DESINFECCIÓN DE AGUA CON OZONO.....	32
3.4.1 SOLUBILIDAD DEL OZONO EN AGUA .....	35
3.4.2 PROCESO DE OZONIZACIÓN .....	36
4. METODOLOGÍA.....	44
4.1 MUESTREO.....	45
4.2 CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO .....	46
4.3 FILTRACIÓN.....	48
4.3.1 COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE FILTRACIÓN EMPLEADOS EN CAMPO .....	48
4.3.2 EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE FILTRACIÓN EN LA REMOCIÓN DE HUEVOS DE <i>Meloidogyne enterolobii</i> .....	49

4.4 DESINFECCIÓN CON OZONO .....	51
4.4.1 PRUEBAS DE DESINFECCIÓN CON OZONO EN MUESTRAS SINTÉTICAS.....	52
4.4.2 PRUEBAS DE DESINFECCIÓN CON OZONO EN MUESTRAS REALES .....	55
4.4.2.1 PRUEBAS DE DESINFECCIÓN CON OZONO EN MUESTRAS RECOLECTADAS EN EL SEGUNDO MUESTREO .....	55
4.4.2.2 PRUEBAS DE DESINFECCIÓN CON OZONO EN MUESTRAS RECOLECTADAS DURANTE EL TERCER MUESTREO .....	56
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	57
5.1 CALIDAD DE AGUA DE RIEGO .....	57
5.2 RESULTADOS DE FILTRACIÓN.....	63
5.2.1 RESULTADOS DE LA COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE FILTRACIÓN .....	63
5.2.2 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE FILTRACIÓN EN LA REMOCIÓN DE HUEVOS DE <i>Meloidogyne enterolobii</i> .....	65
5.3 RESULTADOS DE PRUEBAS DE DESINFECCIÓN CON OZONO.....	67
5.3.1 RESULTADOS DE PRUEBAS DE DESINFECCIÓN CON OZONO EN MUESTRAS SINTÉTICAS.....	67
5.3.2 RESULTADOS DE PRUEBAS DE DESINFECCIÓN CON OZONO EN MUESTRAS REALES.....	73
6. CONCLUSIONES.....	81
RECOMENDACIONES .....	82
ANEXO 1: MÉTODO YODOMÉTRICO .....	83
ANEXO 2: MÉTODO COLORIMÉTRICO ÍNDIGO .....	85
7. BIBLIOGRAFÍA .....	88

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Calidad para agua de riego en México .....	15
Tabla 2 Características de las diferentes etapas de <i>Meloidogyne Enterolobii</i> .....	19
Tabla 3 Diámetro efectivo en filtros de arena y su equivalencia en No. Mesh .....	25
Tabla 4 Ventajas y Desventajas de los Diferentes Gases de Alimentación en los Sistemas de Ozonización .....	38
Tabla 5 Parámetros Fisicoquímicos Analizados y Técnicas Analíticas Empleadas .....	47
Tabla 6 Parámetros Microbiológicos Analizados y Técnicas Analíticas Empleadas .....	47
Tabla 7 Resultados de la Calidad Fisicoquímica de las Diferentes Muestras Recolectadas.....	58
Tabla 8 Resultados de la Calidad Microbiológica de las Diferentes Muestras Recolectadas.....	59
Tabla 9 Resultados de Pruebas de Filtración para Remoción de Huevos de <i>Meloidogyne enterolobii</i> .....	65
Tabla 10 Resultados de pruebas de Ozonación en Muestras Sintéticas con un Flujo de 1.25 Lmin <sup>-1</sup> .....	68
Tabla 11 Resultados de pruebas de Ozonación en Muestras Sintéticas con un Flujo de 0.50 Lmin <sup>-1</sup> .....	69
Tabla 12 Resultados de pruebas de Ozonación en Muestras Sintéticas con un Flujo de 0.75 Lmin <sup>-1</sup> .....	70
Tabla 13 Resultados de pruebas de Ozonación en Muestras Sintéticas con un Flujo de 1.00 Lmin <sup>-1</sup> .....	71
Tabla 14 Resultados de pruebas de Ozonación en Muestras Reales con un Flujo de 1.25 Lmin <sup>-1</sup> .....	74
Tabla 15 Resultados de Pruebas de Ozonación en Muestras Reales con un Flujo de Gas de 0.50 Lmin <sup>-1</sup> .....	75
Tabla 16 Resultados de Pruebas de Ozonación en Muestras Reales con un Flujo de Gas de 0.75 Lmin <sup>-1</sup> .....	76
Tabla 17 Resultados Finales.....	80

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de Sistemas de Filtración por Arena .....	24
Figura 2 Anillo con Ranuras (A), Detalle de Anillo (B), Dos Anillos en Contacto (C) .....	28
Figura 3 Hidrociclón .....	30
Figura 4 Reacciones de Substratos (S) con O <sub>3</sub> y con Subproductos de la Descomposición del O <sub>3</sub> .....	33
Figura 5 Constante aparente de Henry (comparación con valores en la literatura) .....	36
Figura 6 Generación de Ozono por Descarga de Corona .....	39
Figura 7 Cámara de Contacto con Difusor Poroso de Burbujas Finas (Izquierda), Cámara de Contacto Tipo Kerag (Derecha).....	41
Figura 8 Sistema de Contacto y Difusión en Tubo profundo en "U" (Izquierda), Cámara de Contacto con Difusor de Plato Poroso (Derecha).....	42
Figura 9 Ciclo del Agua Empleada en la Irrigación.....	45
Figura 10 Diferentes Sistemas de Filtración Empleados en los Sitios de Interés..	48
Figura 11 Sistema de Filtración Empleado en Pruebas de Remoción de Huevos de <i>Meloidogyne enterolobii</i> .....	50
Figura 12 Columna de Burbujeo (Izquierda), Generador de Ozono (Derecha) .....	52
Figura 13 Huevo de <i>Meloidogyne enterolobii</i> viable (Izquierda) y larva de <i>Meloidogyne enterolobii</i> (Derecha).....	78
Figura 14 Huevos de <i>Meloidogyne enterolobii</i> en estado no viable debido al proceso de ozonación .....	79
Figura 15 Sistema de Tratamiento Propuesto para el Agua de Irrigación .....	80
Figura 16 Reacción de Trisulfonato Potásico de Índigo con Ozono .....	85

## RESUMEN

Debido al aumento en la demanda de agua en los últimos años, el uso de aguas residuales, aguas superficiales y subterráneas se ha hecho más común, representando un riesgo para los cultivos, trabajadores agrícolas y consumidores.

Un aspecto importante que debe tener el agua empleada en el riego agrícola es su calidad microbiológica, siendo las bacterias indicadoras de contaminación fecal y los huevos de nematodo los parámetros más importantes en este aspecto.

El género de nematodo fitoparásito más importante es *Meloidogyne* por su distribución, el rango de hospedantes y los daños que origina en las plantas cultivadas (Godoy-Angulo *et al*, 2012), causando un impacto negativo en los cultivos de gran interés económico.

El presente trabajo propone un sistema de desinfección con ozono para el agua empleada en el riego agrícola con el fin de inactivar los huevos del nematodo *Meloidogyne enterolobii* presentes en el agua de riego.

Para el diseño de cualquier sistema de desinfección es importante conocer la calidad del agua a desinfectar, por lo que se realizaron tres diferentes muestreos a los sitios de interés en el norte del país con el fin de determinar la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua de riego empleada.

Se realizaron pruebas de desinfección con ozono preliminares en muestras sintéticas inoculando una cantidad de huevos conocida de *Meloidogyne enterolobii* con el fin de determinar la dosis de ozono requerida y el tiempo de contacto para lograr la inactivación de todos los organismos presentes.

Las mejores condiciones de los experimentos realizados en laboratorio se repitieron empleando muestras recolectadas en los sitios de interés, a las cuales se les inoculó una cantidad conocida de huevos de *Meloidogyne enterolobii*. En estas muestras adicionalmente a la inactivación del organismo inoculado se evaluó también la acción desinfectante del ozono para bacterias coliformes fecales y hongos presentes en dichas muestras.



## 1. INTRODUCCIÓN

La agricultura es por mucho el sector con mayor extracción y uso consuntivo de agua a nivel mundial; alrededor del 70% de todos los suministros hídricos superficiales son empleados en esta práctica (Ongley, 1997).

El uso de aguas residuales, aguas superficiales y subterráneas contaminadas representa un riesgo para los cultivos, así como para los trabajadores agrícolas y consumidores. Es por eso que existen estándares a nivel mundial para garantizar la calidad del agua empleada en la irrigación.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) cuenta con una guía para evaluar la calidad del agua empleada en la irrigación, independientemente de su origen (Phocaidis, 2000). Los principales parámetros evaluados se dividen en:

- Químicos (salinidad/toxicidad riesgo para el suelo, cultivo y sistema de irrigación).
- Físicos (partículas sólidas y otras impurezas).
- Microbiológicos (problemas de bacterias y otro contenido riesgoso para los humanos, animales, cultivo y suelo).

Dentro de los parámetros biológicos evaluados se encuentran las bacterias coliformes fecales y los huevos de nematodo. Los primeros sirven como un indicador de agentes patógenos bacterianos, siendo el más prominente la *Escherichia coli*. Los segundos abarcan una gran variedad de parásitos, dentro de los cuales destacan los nematodos fitoparásitos.

Las pérdidas de cosecha anuales estimadas debidas a este tipo de nematodos en la producción agrícola mundial se aproxima al 11% y en términos absolutos las pérdidas económicas anuales se calculan con base a los 80 billones de dólares (Agrios *et al*, 2004).

Dentro de los nematodos fitoparásitos el género *Meloidogyne* es el más importante por su distribución, el rango de hospedantes y los daños que origina en las plantas cultivadas (Godoy-Angulo *et al*, 2012). Existen reportes que indican pérdidas en la producción causadas por especies de *Meloidogyne* en los cultivos hortícolas que varían entre el 15 y 60% (Ornat *et al*, 1997). Con el fin de garantizar la calidad microbiológica del agua empleada en el riego se necesita de un proceso de desinfección.

La utilización de ozono como desinfectante del agua para riego aporta diferentes beneficios; al ser un oxidante poderoso actúa destruyendo directamente la membrana celular de bacterias y protozoarios (Gadomska *et al*, 1991). Se ha demostrado en estudios de laboratorio que se logra una remoción del 99% de huevos de nematodo (*Ascaris suum*) en muestras sintéticas (Orta, 2004), el 99.98% de bacterias patógenas, amebas de vida libre (Orta, 2008), así como en agua residual (Campos-Reales-Pineda, 2008).

Además del poder desinfectante del ozono, se favorece la nitrificación y la asimilación de los nutrientes en cultivos de lechuga, rábanos, tomate, menta, manzanilla y col china regados con agua residual desinfectada con ozono. Por la contribución de oxígeno al suelo se produce mayor crecimiento de la planta y mejor apariencia lo cual reduce la necesidad de fertilizantes; además de la reducción de efectos adversos sobre la salinidad o la acidificación del suelo (Orta, 2006; Campos-Reales-Pineda, 2008; Rojas, 2011 y Orta, 2013).

Todo proceso de desinfección está directamente relacionado con la calidad del agua a desinfectar. La finalidad del diagnóstico es identificar, por un lado, si existe la necesidad de añadir algún tipo de tratamiento al agua de riego previo a la desinfección con ozono, y por otro lado, que sirva como base para determinar las condiciones a las cuales se lleva a cabo la desinfección mediante ozono. La desinfección con ozono presenta ventajas ya que es una tecnología bien establecida, escalable y que puede garantizar la calidad microbiológica del agua utilizada para el riego agrícola.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar las condiciones necesarias en el tratamiento de agua para riego agrícola de acuerdo a su calidad fisicoquímica y microbiológica con la finalidad de conseguir la inactivación de nematodos fitoparásitos, hongos y bacterias indicadoras de contaminación fecal, empleando como agente desinfectante ozono.

### 2.2 OBJETIVOS PARTICULARES

Diagnosticar la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua para riego agrícola durante la época de estiaje y de lluvias en los sitios de interés a fin de detectar las variaciones estacionales.

Evaluar el sistema de tratamiento *in situ* y establecer si la calidad del agua posterior al tratamiento se encuentra dentro del intervalo recomendado por la legislación mexicana vigente.

Establecer las variables de diseño: tiempo de contacto y dosis de ozono necesarias para la inactivación de huevos del nematodo *Meloidogyne enterolobii* en muestras sintéticas y muestras de agua para riego agrícola.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 RIEGO AGRÍCOLA

La producción agraria a nivel mundial tiene dos misiones básicas: abastecer de alimentos a la población humana y promover su desarrollo económico social (Santos, 2010).

La necesidad de riego surge a partir del incremento de la insuficiencia alimentaria dado por el crecimiento de la población y la dificultad del cultivo por la insuficiencia de agua (Lobova y Jabarov, 1978).

La escasez de agua constituye una importante limitación para el desarrollo agrícola. Para poder llevar a cabo un buen uso del agua de riego es necesario la incorporación y el aprovechamiento de los avances científicos y tecnológicos a los regadíos.

##### 3.1.1 MÉTODOS DE RIEGO

De acuerdo a Enciso (1995) los métodos de riego se diferencian por la forma en que se aplica el agua en el suelo. Actualmente existen tres métodos básicos: superficial o por gravedad, presurizado o localizado y subsuperficial.

###### 3.1.1.1 RIEGO SUPERFICIAL

En el riego superficial (o por gravedad), el agua se distribuye directamente por la superficie del campo por gravedad a través de surcos, las porciones de tierra y las terrazas planas y se caracteriza por ser técnicamente imperfecto, además de contar con una baja eficiencia de riego, alrededor del 40-60% del agua aplicada es utilizada por el cultivo (FAO, 2010).

Los principales sistemas para este tipo de riego son:

- Riego por canteros: Consiste en aplicar agua a parcelas generalmente rectangulares, con pendiente casi nula, circundadas por lomos, caballones o albardillas que impiden que el agua pase a otros campos.
- Riego por surcos: En estos sistemas el agua corre lentamente y se infiltra a través de los surcos, pequeños canales abiertos regularmente, equidistantes, en el sentido de la mayor distancia. Los surcos deben tener pendiente suave y uniforme ser alimentados por pequeños caudales para que la mayor parte del agua que escurre por ellos se vaya infiltrando uniformemente a lo largo de la parcela.
- Riego por fajas: El campo se divide en fajas, o sea en parcelas rectangulares estrechas y largas, bordeadas lateralmente por caballones, con pendiente suave, donde el agua es aplicada y escurre a lo largo de su recorrido al mismo tiempo que se va infiltrando.

### 3.1.1.2 RIEGO PRESURIZADO

Un sistema de riego presurizado es una instalación que cuenta con tuberías, conexiones y otros aditamentos propiamente diseñados e instalados para proveer agua bajo presión desde un origen al área de riego. En este tipo de sistemas se requiere una fuente de energía externa (bomba) que proporciona al fluido la energía necesaria que necesita para llegar al punto de riego.

Los principales sistemas para este tipo de riego son:

- Riego por aspersión: El agua se distribuye en el campo en forma de llovizna artificial, con la finalidad de reproducir una lluvia natural, por medio del rociado del agua sobre la superficie del suelo a través de equipo especiales de rociado. La eficiencia para este tipo de sistemas esta alrededor del 75% (FAO, 2010).

- Riego por goteo: Es un riego a presión en el que el agua es aplicada a la parte de la parcela cultivada en la que se desarrollan las raíces de la planta. Los dispositivos, a partir de los cuales se aplica el agua al suelo y en la zona radicular, se denominan emisores, los cuales se colocan equidistantes en lateral o por grupos en algunos casos. La eficiencia de este tipo de sistemas es alrededor del 80-90% (FAO, 2010).

### 3.1.1.3 RIEGO SUBSUPERFICIAL

En el riego subsuperficial el agua se aplica directamente a la raíz a través de tuberías enterradas. Estas tuberías son de diferentes diámetros y espesores para satisfacer las necesidades requeridas.

Una de las principales ventajas de este tipo de sistemas es su alta eficiencia. Ya que las tuberías están instaladas en el suelo para cada línea de cultivo en específico, el sistema sólo humedece una parte del volumen total del suelo, dejando espacio para que este pueda almacenar agua de lluvia. Además, ya que las tuberías se encuentran enterradas, prácticamente no hay pérdidas de agua por evaporación. La única pérdida que se presenta es por filtración del agua en el suelo (Laam, 2002).

### 3.2 CALIDAD DEL AGUA PARA EL RIEGO AGRÍCOLA

El aumento en la demanda de agua en la agricultura ha hecho que durante los últimos años el uso de agua residual haya incrementado como una opción para satisfacer esta necesidad, siendo esta misma tratada o sin tratar (Dickin, 2016).

La exposición al agua residual ha sido ligada a enfermedades causadas por virus, bacterias y protozoarios, tales como salmonelosis, cólera, giardiasis, amibiasis, hepatitis A, entre otras (OMS, 2006), así como a enfermedades crónicas, resultado de la exposición a metales pesados que pueden estar presentes.

Las consideraciones de la calidad del agua se han ampliado para cubrir todos los aspectos químicos, físicos y biológicos que pueden causar cualquier impacto en el suelo, plantas, medio ambiente y consumidores (humanos o ganado) (FAO, 2000).

En la Tabla 1 se muestran los parámetros de calidad del agua para riego agrícola así como sus límites permisibles en México dependiendo de la fuente de donde provenga el agua.

**TABLA 1 CALIDAD PARA AGUA DE RIEGO EN MÉXICO**

Parámetro	Fuente			
	Ríos		Embalses Naturales y Artificiales	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Coliformes fecales NMP/100 mL	240	N.A.	240	N.A.
Huevos de nematodo (h/L)	≤1	N.A.	≤1	N.A.
Grasas y aceites (mg/L) (2)	15	25	15	25
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	150	200	75	150
SST (mg/L)	150	200	75	125
Arsénico (mg/L)	0.2	0.4	0.2	0.4
Cadmio (mg/L)	0.20	0.40	0.20	0.40
Cianuros (mg/L)	1.00	3.00	2.00	3.00
Cobre (mg/L)	4.00	6.00	4.00	6.00
Cromo (mg/L)	1.00	1.50	1.00	1.50
Mercurio (mg/L)	0.01	0.02	0.01	0.02
Níquel (mg/L)	2.00	4.00	2.00	4.00
Plomo (mg/L)	0.50	1.00	0.50	1.00
Zinc (mg/L)	10.00	20.00	10.00	20.00
Temperatura °C (1)	N.A.	N.A.	40	40
Materia flotante (3)	AUSENTE	AUSENTE	AUSENTE	AUSENTE
pH	5.5-10	5.5-10	5.5-10	5.5-10
Nitrógeno Total (mg/L)	40	60	40	60
Fósforo Total (mg/L)	20	30	20	30

(1) Instantáneo

(2) Muestra simple promedio ponderado

(3) Ausente según el Método de Prueba definido en la NOM-AA-006

P.D.= Promedio Diario

P.M.= Promedio Mensual

N.A.= No es aplicable

SST= Sólidos Suspendidos Totales

NMP= Número Más Probable

FUENTE: NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997



### 3.2.1 CALIDAD QUÍMICA DEL AGUA PARA RIEGO AGRÍCOLA

Dentro de los parámetros químicos más importantes considerados en la calidad del agua para riego agrícola están:

- Salinidad: El agua empleada para el riego agrícola usualmente contiene una cantidad significativa de sustancias disueltas que en un término general son llamadas sales. El que tan apropiada sea un agua para la irrigación depende en parte de la calidad y tipo de sales presentes (Ayers, 1985).

El problema de salinidad relacionado al agua para irrigación ocurre cuando la cantidad total de sales es lo suficientemente alta que las estas se acumulan en la raíz del cultivo y se extienden, afectando la cosecha. Si una cantidad excesiva de sales se acumula en la raíz, el cultivo tiene dificultad para extraer suficiente agua, lo cual reduce el crecimiento de la misma (Beltran *et al*, 1990; Bauder *et al*, 2011).

- pH: El pH del agua de riego depende fuertemente de la fuente de agua de donde proviene y también depende de los fertilizantes que se adicionen en el proceso de fertirrigación. Un agua con un pH alto, alcalina, provoca que las plantas presenten deficiencia de hierro, zinc y fósforo. Mientras que un agua con un pH bajo, ácido, causa una deficiencia de potasio y nitrógeno (Bauder *et al*, 2011). Se recomienda un pH entre 6.5 a 8.4 (Jeong *et al*, 2016)
- Metales pesados: Los metales pesados presentes en el agua de riego son responsables de problemas de toxicidad en las plantas, aunque en la mayoría de los casos lo que pasa es que se acumulan en la misma planta, las cuales, al ser consumidas, por humanos o ganado, causan diversos problemas de salud (Gupta, 1998).

### 3.2.2 CALIDAD FÍSICA DEL AGUA DE RIEGO

Los principales parámetros físicos considerados para la calidad del agua de riego son:

- Sólidos suspendidos: El agua empleada para riego usualmente no se encuentra en un estado puro, sino que contiene partículas sólidas en suspensión y otro tipo de impurezas.

El contenido sólido suspendido principalmente consiste en material inorgánico (arena, limo, polvo) y material orgánico (algas, bacterias, protozoarios). Los sólidos suspendidos contenidos en el agua varían mucho dependiendo de la naturaleza de la fuente de esta.

El uso de sistemas que emplean tuberías y emisores, propensos a taparse, hace necesario la remoción de los sólidos suspendidos. Además, que se ha observado que varios virus y bacterias pueden adherirse a estos sólidos en suspensión y ser transportados junto con él (Ragusa *et al*, 1994).

- Turbidez: Un alto nivel de turbidez en el agua puede afectar el desempeño de los sistemas de riego (ligado a los sólidos en suspensión), y puede representar una fuente de contaminación para el suelo, disminuyendo su conductividad hidráulica (Vinten *et al*, 1983).

### 3.2.3 CALIDAD MICROBIOLÓGICA DEL AGUA DE RIEGO

En lo que calidad microbiológica corresponde, este es uno de los parámetros más importantes, ya que no sólo representa un riesgo para la salud, sino también para el cultivo.

Dentro de los microorganismos más importantes que se consideran para la calidad del agua de riego están:

- Bacterias coliformes: Las bacterias coliformes se encuentran en el ambiente y en las heces humanas y de animales. La mayoría de estas no causa enfermedades, sin embargo, pueden indicar la presencia de otros

microorganismos que sí (Ashbolt *et al*, 2001). Este tipo de bacterias se dividen principalmente en 2 grupos a la hora de evaluar la calidad microbiológica del agua:

- Coliformes totales: Este grupo de bacterias comprende todos los bacilos gram-negativos aerobios o anaerobios facultativos, no esporulados, que fermentan la lactosa con producción de gas en un lapso máximo de 48 horas a  $35 \pm 1$  °C. Este grupo está conformado por 4 géneros principalmente: *Enterobacter*, *Escherichia*, *Citrobacter* y *Klebsiella* (Camacho *et al*, 2009).
- Coliformes fecales: Está constituido por bacterias gram-negativas capaces de fermentar la lactosa con producción de gas a las 48 horas de incubación a  $44.5 \pm 1$ °C. Este grupo no incluye una especie determinada, sin embargo, la más prominente es *Escheria coli* (*E. coli*), de las cuales algunas cepas provocan enfermedades gastrointestinales (FAO, 2008).
- Helmintos: Este término esta designado a un amplio grupo de organismos que incluye todos los gusanos parásitos (de humanos, animales y vegetales) y de vida libre, con forma y tamaños variados. Poseen órganos diferenciados, y sus ciclos de vida comprenden la producción de huevos o larvas, infecciosas o no, y la alternancia compleja de estadios que incluyen hasta tres huéspedes diferentes (NMX-AA-113-SCFI-2012).

Dentro de los helmintos están los nematodos, los cuales son organismos pluricelulares que miden generalmente menos de 2 mm de largo y cuya organización es bastante compleja, pues poseen todos los órganos y sistemas de órganos encontrados en los animales superiores, excepto sistema circulatorio y respiratorio los cuales no están definidos, siendo algunas especies nocivas para los consumidores (humano o ganado) y otras para las plantas.

Se han identificado más de 4,100 especies de nematodos parásitos en plantas (Decraemer y Hunt, 2006) de las cuales algunas son de especial interés pues son las principales responsables de pérdidas de cultivo, generando grandes pérdidas económicas (Nicol *et al*, 2011).

Este estudio se enfoca a los nematodos de la especie *Meloidogyne enterolobii*, especie identificada como la responsable del daño en cultivos en el norte del país y que representa un problema debido a la facilidad con la que se expande, su alta fertilidad y la estructura de la pared de los huevos, la cual los protege y hace difícil su desinfección (Bebber *et al*, 2014).

Esta especie se puede encontrar en fuentes de agua de riego en su etapa de huevo y larva, lo que causa su propagación e infección a diferentes cultivos (Hugo y Malan, 2006).

En la Tabla 2 se muestran las características de esta especie en la etapa de huevo, juvenil 2 (j2), hembras y machos.

**TABLA 2 CARACTERÍSTICAS DE LAS DIFERENTES ETAPAS DE *MELOIDOGYNE ENTEROLOBII***

Características de los huevos		Características “juvenil 2”		Características de las hembras		Características de los machos	
Largo (µm)	Ancho (µm)	Largo (µm)	Ancho (µm)	Largo (µm)	Ancho (µm)	Largo (µm)	Ancho (µm)
85-104	33-42	250-700	12-18	400-1300	300-700	700-2000	25-45

Fuente: European and mediterranean plant protection organization (2014). *Meloidogyne enterolobii*. *Bulletin ocpp/eppo* 44,159-163.

Los huevos de *Meloidogyne enterolobii* cuentan con una cubierta que está constituida por tres capas (Noble, 1982):

- Capa interna lipídica compuesta por sacarósidos y proteínas.
- Capa media compuesta por quitinosa.
- Capa externa compuesta por proteínas y mucopolisacáridos.

### 3.3 FILTRACIÓN

La filtración consiste en una operación diseñada para separar partículas suspendidas de un medio fluido al hacerlo pasar a través de una membrana o medio poroso. El fluido o suspensión pasa a través de los poros o espacios vacíos del medio filtrante, las partículas sólidas son retenidas en la superficie del medio, o en algunas ocasiones, en las paredes de los poros, mientras que el fluido, que recibe el nombre de filtrado, pasa a través de este (Cheremisinoff, 1998).

Esta operación se basa en el tamaño de partícula, mientras que las partículas por debajo de cierto tamaño logran pasar la barrera, las de superior tamaño son retenidas en o sobre el medio filtrante para más tarde ser removidas. El tamaño de separación es característico del medio filtrante empleado.

La filtración puede ser clasificada principalmente de dos maneras:

- Con base en el tamaño de partículas que separan:
  - Macrofiltración: Separa partículas en el rango de tamaño de un milímetro a 10 micrómetros.
  - Microfiltración: Separa partículas de 10 a 0.1 micrómetros.
  - Ultrafiltración: Separa partículas menores a 0.1 micrómetros.
- De acuerdo a la manera en que las partículas se separan:
  - Filtración superficial: Las partículas son retenidas en la superficie del medio filtrante, formando capas sobre esta misma. Es empleada para tratar fluidos con una alta concentración de partículas.
  - Filtración profunda: Las partículas son removidas al depositarse a través del medio filtrante. Es aplicada principalmente para fluidos con baja concentración de partículas.

Los parámetros físicos responsables de la hidrodinámica de un flujo a través de un material poroso son (Cheremisinoff, 1998):

- Permeabilidad: Es el recíproco de la resistencia al flujo ofrecida por el filtro, por lo tanto, una alta permeabilidad representa una baja resistencia al flujo y viceversa.
- Porosidad: Se refiere a la fracción del medio que contiene espacios vacíos.
- Tortuosidad: Se define como la longitud promedio relativa del canal de flujo
- Conectividad: Define el arreglo y número de conexiones entre poros.

Dado que un filtro no puede ser capaz de remover todos los sólidos suspendidos, habrá un punto de corte en el tamaño de partícula por arriba del cual ninguna partícula puede atravesar el filtro. El punto de corte por lo tanto se refiere al diámetro, usualmente expresado en micrómetros ( $\mu\text{m}$ ), de la partícula más grande que puede atravesar el filtro, aunque este no es el tamaño más pequeño de partículas retenidas por el filtro, porque partículas más pequeñas raramente son retenidas (Tien, 2012).

### 3.3.1 APLICACIONES

La separación de sólidos de un fluido tiene principalmente dos propósitos: la remoción de sólidos indeseables o la recuperación de algún producto sólido deseado.

Los contaminantes, impurezas menores, están normalmente presentes en todos los fluidos, naturales o procesados. Cuando el nivel de contaminación en el fluido es significativo, principalmente si va a ser consumido o empleado para ser procesado después, se vuelve necesaria la remoción de dichas impurezas (Sutherland, 2008).

Hoy en día, la filtración tiene un rol importante en la protección del medio ambiente. En el aire se emplea entre otras cosas para:

- Limpiar la corriente de entrada a lugares habitables.
- Respiradores.

- Tratamiento de aire comprimido y sistemas neumáticos.

Para el agua dentro de sus principales usos resaltan:

- Producción de agua potable a partir de agua superficial o subterránea.
- Tratamiento de aguas residuales para su descarga o reúso.
- Producción de agua ultra pura.

### 3.3.2 IMPORTANCIA DE LA FILTRACIÓN EN LOS SISTEMAS DE RIEGO

La calidad fisicoquímica y microbiológica del agua es un factor muy importante en el manejo de los sistemas de riego localizado (goteo, microaspersión y microjets).

Un problema común en los sistemas de riego localizado es el taponamiento de los emisores por la presencia de sólidos en suspensión. Estos al obstruirse, alteran la sección o área conductora de agua reduciendo el caudal de descarga. Un alto grado de obstrucción en los emisores provocará una distribución desuniforme del agua, afectando así el crecimiento vegetativo, vigor, calibre de fruta y producción.

El taponamiento de los emisores en los sistemas de riego localizado puede ser clasificado en 3 tipos (Bucks *et al*, 1979):

- Taponamiento físico. - Causado por las partículas orgánicas e inorgánicas suspendidas.
- Taponamiento químico. - Resultado de los sólidos disueltos que al interactuar entre sí precipitan.
- Taponamiento biológico. - Debido a algas y bacterias que forman una biopelícula.

Para minimizar el riesgo de taponamiento, se debe disponer de sistemas de filtrado que mejoren la calidad del agua. Estos sistemas deben ser diseñados en forma cuidadosa y operados en forma apropiada para mantener el buen rendimiento del sistema de riego.

Para la selección del tipo y tamaño de filtro apropiado deben considerarse los siguientes aspectos:

- Tipo, tamaño y concentración de las partículas en suspensión en el agua de riego.
- La calidad del agua requerida para asegurar el buen funcionamiento de los emisores.
- El caudal de diseño y pérdida de carga nominal del filtro.

Los sistemas de filtración en este caso tienen como principal objetivo la reducción significativa del contenido de compuestos orgánicos y sólidos en suspensión para controlar el taponamiento (McDonald *et al*, 1984), sin llegar a eliminarlo totalmente (Tajrishy *et al*, 1994). En algunos casos las partículas en suspensión pueden ser de naturaleza orgánica (algas, bacterias, musgos) o de naturaleza inorgánica (arena, limo, arcilla).

Respecto a las partículas de tipo inorgánico, es importante conocer el tamaño, ya que es el primer paso para determinar el diseño apropiado y garantizar el buen funcionamiento de un sistema de filtros.

La capacidad de los filtros para retener partículas sobre un determinado tamaño se expresa en unidades *mesh* que significa el número de orificios que tiene una malla por pulgada lineal, contados a partir del centro de un hilo. Por ejemplo, una malla de 120 mesh o 120 orificios. El número de mesh no se refiere en ningún caso al tamaño de los orificios, sino al número de estos. La FAO (2010) recomienda:

- Mesh 16-25 (1000-500 micrones) para aspersores de lenta rotación y presión media.
- Mesh 60-100 (250-120 micrones) mini y micro-aspersores y rociadores.
- Mesh 80-160 (200-100 micrones) para goteros.

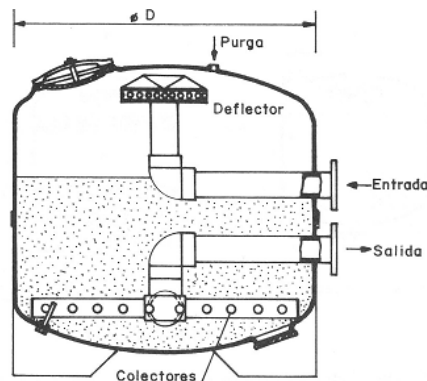


### 3.3.3 FILTROS MÁS COMUNES PARA SISTEMAS DE RIEGO

Los tipos más comunes de filtros empleados para los sistemas de riego son: de grava o arena de cuarzo, anillos, malla e hidrociclones, que son los filtros estudiados para este trabajo.

#### 3.3.3.1 FILTROS DE GRAVA O ARENA DE CUARZO

Los filtros de grava son muy utilizados cuando se dispone de aguas con altos niveles de partículas orgánicas e inorgánicas, teniendo la particularidad de atrapar y retener niveles importantes de contaminantes sin aumentar significativamente la pérdida de carga. Ya que la remoción de estas partículas se lleva a cabo por mecanismos tanto físicos como químicos. En un principio pueden retener partículas cuyo tamaño sea mayor al tamaño de poro, pero también retienen partículas menores por las interacciones que se presentan entre los granos de arena y estas (Adin y Alon, 1986).



**FIGURA 1 ESQUEMA DE SISTEMAS DE FILTRACIÓN POR ARENA**

Fuente: Manual de operación y mantenimiento de equipos de riego presurizado, 2001.

Estos filtros consisten generalmente en dos o más tanques conectados en paralelo con una entrada y salida de agua común. El agua ingresa al tanque por la parte de arriba y pasa a través de la grava que actúa como medio filtrante y es colectada el agua ya filtrada en el fondo.

La capacidad de flujo en un filtro de este tipo está determinada por el diámetro y la tasa de filtrado, expresado en unidades de longitud y caudal/área respectivamente.

El diámetro de los filtros se expresa en pulgadas y la tasa de filtración en galones por minuto/pie<sup>2</sup> (gpm ft<sup>2</sup>).

En los filtros de arena no es posible medir el tamaño de los orificios como podría hacerse directamente en un filtro de malla, pero se puede asociar la calidad del filtrado a un equivalente de unidades mesh. En este caso se clasifica la grava o arena de acuerdo a la granulometría del material y del tamaño de los poros. En la Tabla 3 se proporciona información sobre el diámetro de poros y la equivalencia con filtros de mallas en cuanto a calidad del filtrado.

**TABLA 3 DIÁMETRO EFECTIVO EN FILTROS DE ARENA Y SU EQUIVALENCIA EN NO. MESH**

MATERIAL	Clase	Ø EFECTIVO		Ø POROS		Mesh
		(mm)	Micrones	(mm)	Micrones	
Granito molido	N° 8	1,50	1.500	0,214	214	70
Granito molido	N° 11	0,78	780	0,111	111	140
Arena de Sílice	N° 16	0,66	660	0,094	94	170
Arena de Sílice	N° 20	0,46	460	0,066	66	230
Arena de Sílice	N° 30	0,27	270	0,039	39	400

Fuente: Manual de operación y mantenimiento de equipos de riego presurizado, 2001.

Existen principalmente dos tipos de operación de este tipo de equipos: la filtración lenta con arena (SSF, por sus siglas en inglés Slow Sand Filtration) y la filtración rápida con arena (RSF, por sus siglas en inglés Rapid Sand Filtration).

### 3.3.3.2 FILTRACIÓN LENTA CON ARENA

Es una de las tecnologías más antiguas y efectivas para el tratamiento de agua, siendo empleada mundialmente para la potabilización del agua superficial durante los últimos 150 años.

Las principales características de este tipo de sistemas son los bajos flujos que manejan (0.1-0.3 m<sup>3</sup>m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>), así como la biopelícula que se forma en la superficie del lecho de arena, denominada como Schmutzdecke (palabra de origen alemán), y que dependiendo de las características de la alimentación y bajo las condiciones adecuadas no se necesita alguna otra etapa de tratamiento.

Al Schmutzdecke se le atribuye la mayor remoción de partículas en suspensión y microorganismos. Los mecanismos de remoción en esta capa son una combinación de tensión (asociado con la resistencia al flujo ofrecida por el filtro), la adsorción y predación (actividad biológica) (Schijven *et al*, 2013). Se ha observado que esta capa aumenta con el tiempo y decrece dentro del lecho mientras mayor va siendo la profundidad del mismo (Campos *et al*, 2002).

Al depender de la capa biológica, esta filtración depende fuertemente de la edad de esta y de la temperatura del agua (Amy *et al*, 2006). Junto con el crecimiento de la capa biológica hay un incremento en la resistencia al flujo y eventualmente al taponamiento de este. Aunque se ha encontrado que el volumen de las bacterias que se forman no excede al 0.2% de los espacios de poro, sin embargo, los polímeros extracelulares producidos por estas mismas ocupan al menos 7% de los espacios de poro en la parte superior y 3% en la parte interna del filtro (Mauclare *et al*, 2004).

Es así que la efectividad de este tipo de filtros es el resultado de una interacción entre procesos biológicos, físicos y químicos entre el agua y el sistema (Calvo-Bado *et al*, 2003). Resultando en una efectiva remoción de turbidez y algunos microorganismos, con una limitada remoción de compuestos orgánicos.

El uso de este tipo de filtración como parte de un tratamiento está condicionado a la carga orgánica del efluente, obteniéndose así mayores eficiencias de remoción en parámetros fisicoquímicos y microbiológicos (Zuluaga *et al*, 2009).

Se ha observado también que la remoción de huevos de nematodo en este tipo de sistemas es afectada principalmente por la altura del lecho (Zuluaga *et al*, 2009).

Este tipo de filtros son relativamente baratos, remueven turbidez y la propagación de patógenos de plantas, además de bacterias y algunos virus, en general mejoran la calidad del agua.

Dentro de sus principales desventajas están los bajos flujos que deben manejarse para su correcto funcionamiento, el área de instalación que requiere este tipo de

equipos, la variación en el desempeño del equipo con interrupción en el flujo, la remoción/restauración del Schmutzdecke y especificaciones técnicas en cuestión del tipo de arena empleada.

### 3.3.3.3 FILTRACIÓN RÁPIDA CON ARENA

La filtración rápida con arena (flujos mayores a  $2 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$ ) es eficiente removiendo principalmente partículas en suspensión, y una limitada cantidad de bacterias, protozoarios y huevos de nematodo, ya que estos últimos pueden adherirse fácilmente a la sílice. Para que esto se dé el tamaño del medio filtrante debe de estar entre 0.8-1.2 milímetros y los lechos deben de tener una altura mínima de un metro para flujos constantes entre 7 y  $10 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$  (Jimenez, 2007).

A diferencia de la filtración lenta, la filtración rápida suele estar acompañada de alguna etapa previa, generalmente coagulación/floculación, ya que ahora domina la filtración profunda que se lleva a cabo dentro del lecho, presentando limitada actividad biológica en la superficie.

Se ha observado que mientras más alto sea el flujo mejor es el transporte de los microorganismos, mejorando la filtración profunda en el lecho filtrante, mientras que se reduce la filtración superficial debido a la baja en el tiempo de retención y a las fuerzas hidrodinámicas en la superficie del medio filtrante (Yu, 2015).

Para este tipo de sistemas se ha reportado la remoción de *Escherichia Coli* ( $\leq 4.7$  log), *Enterococci* ( $\leq 2.4$  log), esporas de *Clostridium perfringens* ( $\leq 2.1$  log) y colifagos ( $\leq 2.8$  log) (Seger *et al*, 2016).

### 3.3.3.4 FILTROS DE ANILLOS

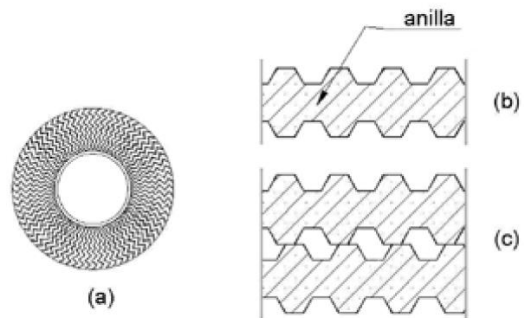
Los anillos son discos de plástico con ranuras impresas sobre un soporte central cilíndrico y perforado. El agua es filtrada al pasar por los pequeños conductos formados entre dos anillos consecutivos. Dependiendo del número de mesh y del tamaño de poro de cada anillo es la calidad del filtrado.

Ya que la forma de las ranuras no es uniforme, los pequeños ductos que se forman tienen diferentes secciones y tamaños, proporcionando así un efecto de filtrado tanto en superficie como en profundidad, la cual está dada por el radio de los discos.

Estos filtros se comercializan en unidades y suelen ser fabricados generalmente de plástico, polietileno de alta resistencia u otro material sintético resistente a la corrosión.

En estos equipos la filtración se da en dos etapas. La primera ocurre en la superficie externa del disco, donde las partículas son retenidas, la segunda se lleva a cabo dentro del disco, donde se da la adhesión y retención de partículas más pequeñas, principalmente materia orgánica (Martínez, 2001).

Se ha observado que los filtros de discos y los de arena tienen un desempeño parecido al tratar agua para su reuso (Capra y Scicolone, 2004).



**FIGURA 2 ANILLO CON RANURAS (A), DETALLE DE ANILLO (B), DOS ANILLOS EN CONTACTO (C)**

Fuente: Manual de operación y mantenimiento de equipos de riego presurizado, 2001.

### 3.3.3.5 FILTROS DE MALLA

Este tipo de unidades es utilizado principalmente para filtrar aguas con altas cargas de contaminantes inorgánicos y moderadas cargas de contaminantes orgánicos. No es recomendable su uso en aguas con alto contenido de residuos orgánicos, ya que estos obstruyen rápidamente las cribas.

Las mallas se clasifican por el tamaño de la abertura, asociada al número de malla (Norma ISO/R 565) o número de mesh.

Existen diversos tipos de mallas y es necesario diferenciar entre las fabricadas por empresas especializadas (filtros industriales) y aquellas por industrias locales (filtros artesanales).

Los filtros de malla industriales poseen diversas características como la capacidad para automatizar el retrolavado, uso de escobillas móviles, eliminación de impurezas por succión, entre otras.

Una situación muy frecuente que dificulta el manejo de los filtros de malla ocurre cuando la captación de agua en el estanque acumulador se encuentra muy cerca del fondo. La velocidad de flujo en las cercanías de la captación es suficientemente alta como para arrastrar partículas depositadas en el fondo (Martínez, 2001).

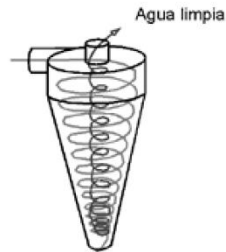
#### 3.3.3.6 HIDROCICLÓN

Su función principal es eliminar gran parte de los sólidos en suspensión, por lo que es conveniente colocarlo previo a algún otro tipo de filtro. Trabaja muy bien reteniendo partículas de sólidos hasta el tamaño de 100  $\mu\text{m}$ . Este equipo se recomienda cuando se riega con aguas turbias

Su principio de funcionamiento es hacer girar el agua en forma de un remolino. El punto de menor presión es el centro del remolino donde tienden a emigrar las partículas sólidas en suspensión. Estas se acumulan en un pequeño receptáculo ubicado en la parte inferior.

El hidrociclón no sirve para eliminar partículas de naturaleza orgánica como bacterias, algas y materia orgánica dispersa, ya que presentan una densidad específica menor a los sólidos en suspensión. Estas partículas logran pasar el dispositivo siendo necesaria su eliminación en algún proceso posterior.

En el hidrociclón la pérdida de carga se mantiene constante en el tiempo, independientemente del grado de suciedad y es función del caudal y las dimensiones del equipo (Martínez, 2001).



**FIGURA 3 HIDROCIKLÓN**

Fuente: Manual de operación y mantenimiento de equipos de riego presurizado, 2001

### 3.3.4 SELECCIÓN DEL FILTRO

La selección del filtro a utilizar debe comenzar con la clara definición del trabajo para el cual se requiere. Es necesario saber si el fluido a filtrar es un gas o un líquido, pues los equipos para la filtración de ambos fluidos son sumamente diferentes en el diseño.

Lo siguiente a tener en cuenta es qué cantidad de sólidos suspendidos se desea remover por unidad de tiempo, ya que en lo concerniente a la capacidad del medio filtrante decidirá el tiempo de operación. En este punto aún existen una amplia variedad de equipos de filtración entre los cuales se puede elegir, por lo que el siguiente parámetro a tomar en cuenta es donde se localizará el equipo y el espacio del cual se dispone para su instalación.

Una vez hecho esto es necesario saber lo que se va a procesar, el fluido y el material en suspensión, para asegurar que el sistema de filtración seleccionado sigue siendo compatible con estos materiales, el medio filtrante y la estructura del filtro.

Por último, un factor decisivo es el costo. Primero, el costo del equipo en sí y decidir si el presupuesto se ajusta a este. Después, los costos de operación y la vida útil

del equipo, así como el costo de mantenimiento. Un filtro barato, usualmente suele requerir una gran inversión en piezas de remplazo durante su vida útil (Sutherland, 2008).



### 3.4 DESINFECCIÓN DE AGUA CON OZONO

El objetivo primordial de los procesos de desinfección, como parte del tratamiento de aguas residuales, es la inactivación o destrucción de los microorganismos patógenos que puedan encontrarse en el agua (Hammeken y Romero, 2005); contrario a la remoción, el concepto de inactivación se refiere al efecto que tiene la aplicación del desinfectante en la destrucción de la estructura celular o en la interrupción en su metabolismo, biosíntesis o habilidad de desarrollarse/reproducirse (EPA, 2011).

Según la Comisión Nacional del Agua (2009) un desinfectante ideal para el agua debe cumplir con:

- Destruir todas las clases de agentes patógenos y en cantidad suficiente.
- No ser tóxico para el hombre ni animales domésticos.
- No tener un sabor desagradable
- Tener un costo razonable.
- Ser de manejo, transporte y almacenamiento accesibles y seguros.
- No reaccionar con los compuestos presentes en el agua para producir sustancias tóxicas.

La desinfección con ozono tuvo sus inicios en 1906 con la planta de tratamiento de agua *Bon Voyage* en Niza, Francia, donde se instaló ozono para desinfectar las aguas de los riachuelos de las montañas a fin de asegurar la desinfección sin introducir olor o sabor ajenos al agua.

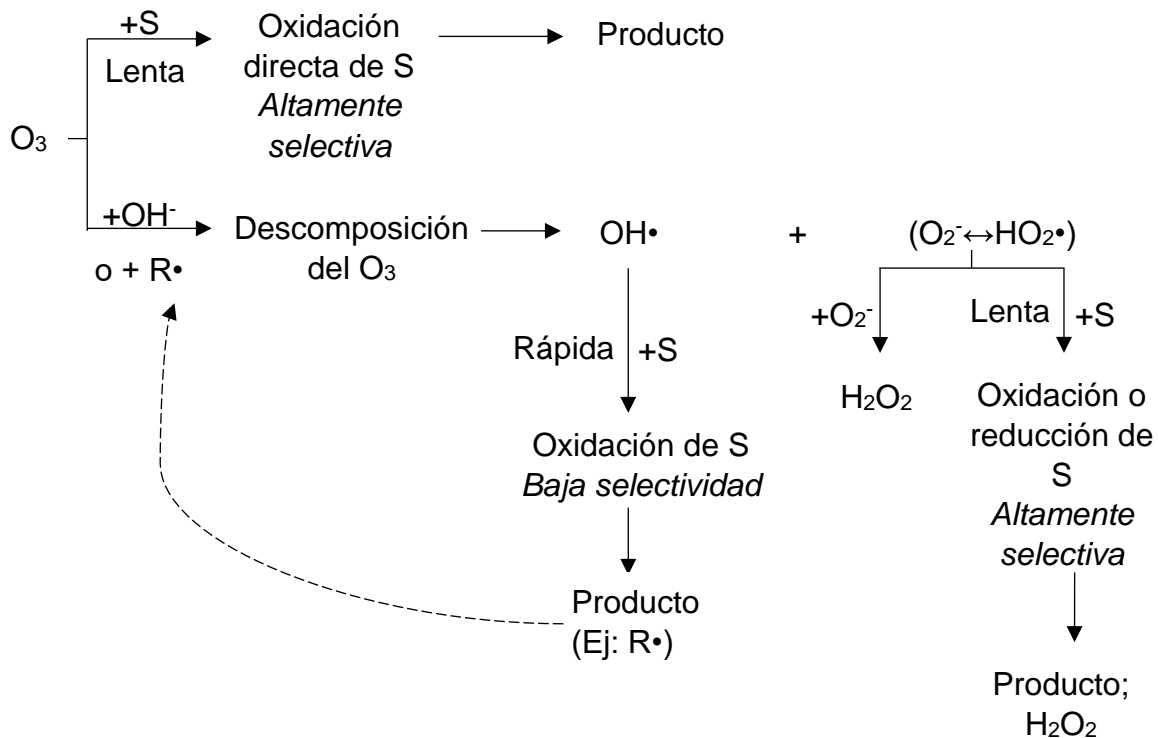
A presión y temperatura ambiente el ozono se produce como un gas inestable, ligeramente más denso que el aire y con un olor desagradable característico. Es un poderoso agente de oxidación y desinfección, por lo cual puede degradar muchos materiales tanto orgánicos como inorgánicos.

Además de la desinfección, algunas de las principales aplicaciones del ozono son:

- Tratamiento para agua potable.
- Tratamiento para agua residual.
- Industria farmacéutica (tratamiento UP, síntesis química, empaque).
- Blanqueado de pulpas de papel.
- Control de olores.
- Asistencia en la determinación química analítica.

Como desinfectante, el ozono tiene principalmente dos mecanismos de acción:

- Oxidación directa del ozono en su forma molecular.
- Oxidación indirecta mediante radicales  $\text{OH}\cdot$ .



**FIGURA 4 REACCIONES DE SUBSTRATOS (S) CON  $\text{O}_3$  Y CON SUBPRODUCTOS DE LA DESCOMPOSICIÓN DEL  $\text{O}_3$**

Fuente: Hoigne y Bader, 1976.

Hoigne y Bader (1976) encontraron que de los dos mecanismos descritos en la Figura 4, la oxidación directa es el mecanismo principal cuando el pH es ácido, mientras que la oxidación indirecta prevalece a pH alcalinos; esto debido a que la cinética de descomposición del ozono se favorece en condiciones básicas.

En un proceso de desinfección el desempeño del desinfectante está definido usualmente como una inactivación logarítmica (EPA, 2011):

$$\text{Log Inactivación} = \log_{10} \left( \frac{\text{viabilidad original}}{\text{viabilidad después del tratamiento}} \right)$$

De acuerdo a la cinética descrita por la ley de Chick-Watson (Langlais *et al*, 1991):

$$\frac{dN}{dt} = -C^n N$$

N es la concentración inicial de organismos viables

C es la concentración del desinfectante

t es el tiempo

n es una constante

Para un valor de C constante, la forma integrada de la ley de Chick-Watson es:

$$\ln \left( \frac{N}{N_0} \right) = -C^n t$$

$N_0$  es la concentración inicial de organismos viables.

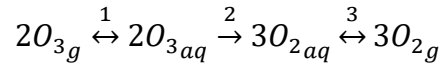
Usualmente, el valor de n se asume que es aproximadamente 1, en cuyo caso:

$$\ln \left( \frac{N}{N_0} \right) = -Ct$$

Por lo que para lograr cierto grado de desinfección es necesario mantener cierta concentración de desinfectante (C) durante cierto tiempo (t). Este valor depende del desinfectante, así como del organismo a desinfectar.

### 3.4.1 SOLUBILIDAD DEL OZONO EN AGUA

La determinación de la solubilidad del ozono en agua es complicada debido a que el ozono se descompone irreversiblemente en agua (Battino, 1983).



La solubilidad del ozono en agua está caracterizada por la ley de Henry (Egorova *et al*, 2015; Roth & Sullivan, 1981), la cual establece que la solubilidad de un gas en cualquier disolvente aumenta al incrementar la presión del gas sobre el disolvente. Por lo tanto, la solubilidad del gas es directamente proporcional a su presión parcial sobre la disolución (Brown *et al*, 2004). Se puede expresar de la siguiente forma:

$$P_j = Hx_j$$

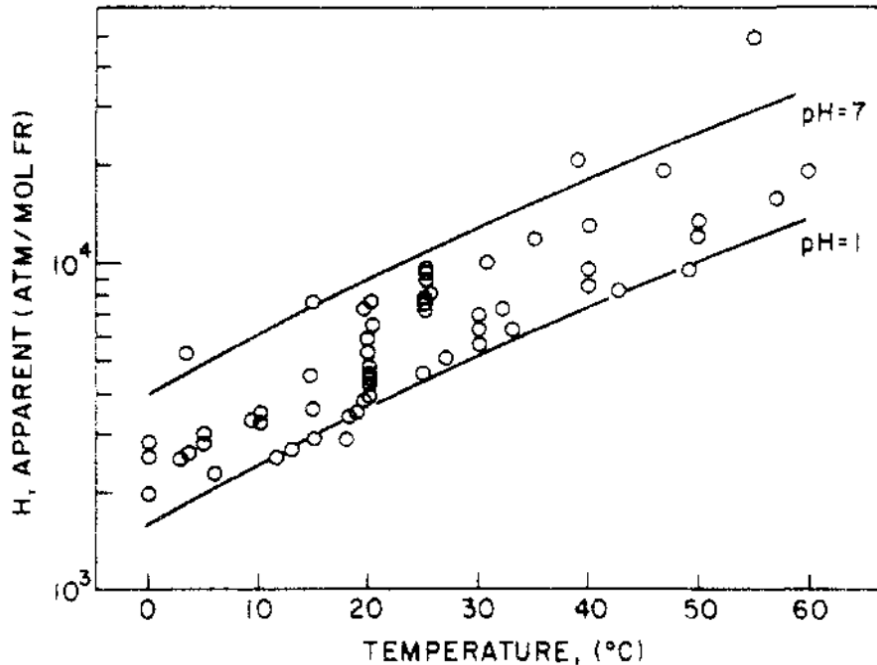
$P_j$  es la presión parcial del componente  $j$  en el gas

$x_j$  es la fracción molar del componente  $j$  en el líquido

$H$  es el coeficiente de Henry a cierta temperatura para el componente  $j$  en el disolvente. En la forma en que se encuentra expresado en la ecuación tiene unidades de atm fracciónmolar<sup>-1</sup>.

La solubilidad del ozono en agua es afectada por el pH y la temperatura. Estudios reportan que la solubilidad del ozono decrece en medios ácidos (pH<2) y en soluciones alcalinas (pH>8). Sin embargo, se ha encontrado que la disminución en la solubilidad por efecto del pH no está asociada al proceso de absorción del ozono, si no con el aumento en su descomposición en este tipo de medios (Egorova *et al*, 2015).

Por su parte el efecto de la temperatura con la disminución de la solubilidad del ozono en agua está relacionado con el aumento en el coeficiente de Henry, el cual se ha encontrado aumenta con la temperatura (Roth & Sullivan, 1981). En la Figura 5 se muestran diferentes valores de H a distintas condiciones de temperatura y pH.



**FIGURA 5 CONSTANTE APARENTE DE HENRY (COMPARACIÓN CON VALORES EN LA LITERATURA)**

Fuente: Roth & Sullivan, 1981.

### 3.4.2 PROCESO DE OZONIZACIÓN

Existen 4 etapas principales en un sistema de ozonización: preparación del gas de alimentación, la generación de ozono, el contactor de ozono y la destrucción del ozono no transferido.

#### 3.4.2.1 PREPARACIÓN DEL GAS DE ALIMENTACIÓN

Este paso es esencial pues afecta el rendimiento de la producción de ozono. La calidad y la concentración del ozono producido dependen directamente del secado del aire alimentación.

La calidad de ozono producido depende del tipo de gas alimentado, el cual puede ser:

- Aire.
- Oxígeno de alta pureza (de generación criogénica o de separación de aire de adsorción por oscilación de presión).
- Oxígeno líquido de alta pureza (LOX).
- Aire enriquecido con oxígeno.

La elección del tipo de gas de alimentación depende de la disponibilidad del mismo, de los requerimientos de ozono en el proceso y del costo. En la Tabla 4 se presentan las ventajas y desventajas de los diferentes gases de alimentación.

En general, se requiere que el gas esté libre de partículas y humedad, para asegurar un buen funcionamiento del sistema. Es por esto que, dependiendo del gas de alimentación seleccionado, será necesario un proceso de filtración y secado del gas. Los sistemas alimentados por aire y por aire enriquecido por oxígeno son los que suelen requerir de estos procesos

**TABLA 4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES GASES DE ALIMENTACIÓN EN LOS SISTEMAS DE OZONIZACIÓN**

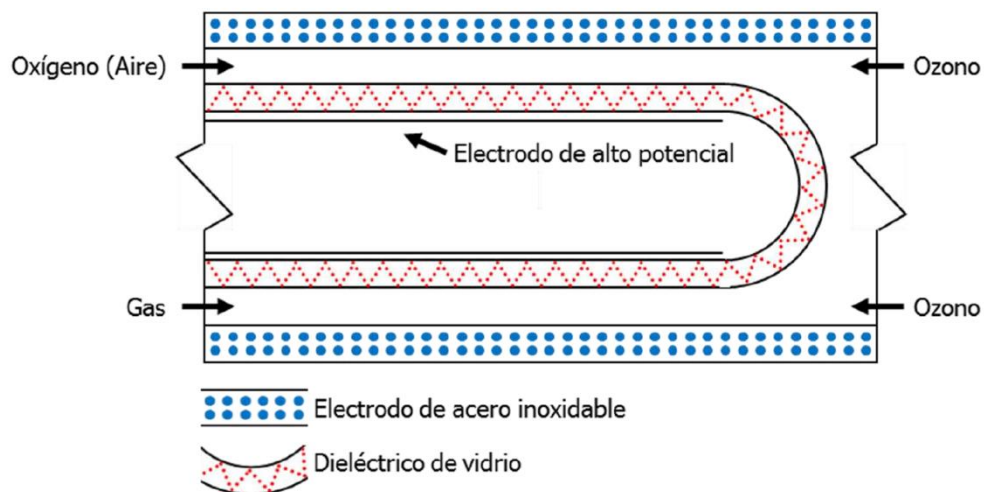
<b>Gas</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Aire	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Equipo de uso común</li> <li>-Tecnología probada</li> <li>-Adecuado para sistemas a pequeña y mediana escala</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mayor consumo de energía por volumen de ozono generado</li> <li>-Mayores requerimientos de equipo para manejo de gases</li> <li>-Concentración máxima de ozono de 3-5% (%m m<sup>-1</sup>)</li> </ul>
Oxígeno	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Concentraciones de O<sub>3</sub> más elevadas (8-14%)</li> <li>-Adecuado para todo tipo de sistemas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Existen mayores riesgos de seguridad</li> <li>-Se requieren materiales resistentes al oxígeno</li> </ul>
LOX	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Menores requerimientos de equipo</li> <li>-Fácil operación y mantenimiento</li> <li>-Se puede almacenar oxígeno para cumplir con demandas pico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Variación entre los precios del LOX</li> <li>-Se requiere almacenar oxígeno en el sitio (mayores riesgos)</li> <li>-Pérdida de oxígeno cuando no está en uso (boil-off)</li> </ul>
Oxígeno criogénico	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Equipo similar utilizado para preparación de aire</li> <li>-Adecuado para sistemas de gran escala</li> <li>-Se puede almacenar oxígeno para cumplir con demandas pico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Equipo de mayor complejidad que el LOX</li> <li>-Se requiere de un alto nivel de sofisticación en el equipo de manejo de gas</li> <li>-Altos requerimientos de capital</li> <li>-Mantenimiento y operación compleja</li> </ul>

Fuente: Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual USEPA, 1999

### 3.4.2.2 GENERACIÓN DE OZONO POR DESCARGA DE CORONA

El efecto corona es un fenómeno de descarga eléctrica en gases, caracterizado por bajas intensidades de corriente (miliamperios), alta densidad de corriente y potencial eléctrico del orden de potencia de chispa del gas (Carlins *et al*, 1982). Una vez en este punto el gas se encuentra en estado de plasma no térmico, es decir está constituido por especies cargadas como iones, electrones, radicales y especies neutras como átomos y moléculas (Brachhold *et al*, 2005).

En un reactor de descarga de corona (Figura 6), el gas está localizado en la mitad de dos electrodos metálicos conectados a una fuente de tensión, donde uno o ambos electrodos se cubren con un dieléctrico, produciendo microdescargas pulsadas aleatorias que emanan del electrodo metálico al dieléctrico y se extinguen en nanosegundos ( Wojtowicz, 2005).



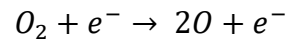
**FIGURA 6 GENERACIÓN DE OZONO POR DESCARGA DE CORONA**

Fuente: Langlais *et al*, 1991

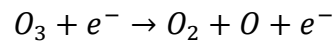
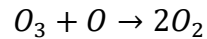
Un modelo cinético simplificado de las reacciones presentes en la generación de ozono por descarga de corona plantea la colisión de una molécula de oxígeno con electrones de alta energía (6-7 eV) produciendo oxígeno monoatómico. El oxígeno monoatómico interacciona con una molécula de oxígeno, y una partícula M, donde



M puede ser otra molécula presente en el gas, las paredes del reactor o una superficie sólida (Carlins *et al*, 1982).



A su vez el ozono puede reaccionar con electrones de alta energía y oxígeno monoatómico, descomponiéndose en moléculas de oxígeno.



En la producción de ozono por descarga de corona el gas de alimentación debe estar libre de partículas y humedad, ya que de esto depende directamente la producción de ozono.

#### 3.4.2.3 CONTACTOR DE OZONO

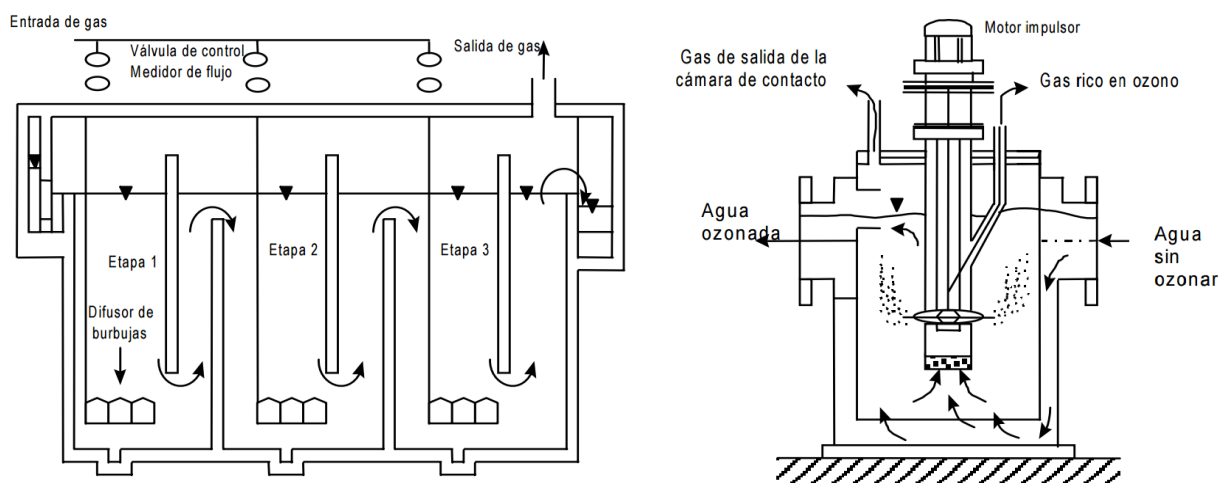
Ya que la producción de ozono se lleva a cabo en fase gas, este tiene que ser transferido posteriormente al agua. Para llevar a cabo esta transferencia se emplea una unidad denominada cámara de contacto, la cual varía en términos de diseño, condiciones de operación y el punto de introducción del ozono (CONAGUA, 2007).

La concentración requerida de ozono determina el tamaño y la geometría del sistema de contacto (Langlais *et al*, 1991). El diseño está fuertemente influenciado por la baja solubilidad del ozono en las concentraciones en que comúnmente se encuentra en el gas de alimentación (de 1 a 10%).

Junto con la cámara de contacto, el difusor es una parte clave. Los más usados son los difusores porosos de burbuja fina, debido a que no requiere energía adicional ya que se aprovecha la que se genera al comprimir el aire (CONAGUA, 2000).

Las principales cámaras de contacto se describen a continuación:

- Cámara de contacto en multietapas con difusor poroso de burbujas finas: son construidas de concreto con cemento resistente a la humedad y corrosión. Se diseñan de 1 a 6 etapas separadas por mamparas (Figura 7). El gas se aplica por el fondo, a contracorriente del flujo de agua a través de difusores porosos, reciclando los gases de salida de la primera etapa (CONAGUA, 2000).
- Cámara de contacto tipo Kerag con mezclador de turbina con presión positiva o negativa: utiliza un propulsor giratorio rápido con base perforada, a través de la cual se introduce el ozono por el fondo (Vázquez, 1996). Este sistema es común en cámaras de contacto múltiples (hasta 4) donde los gases de salida de la segunda cámara son transportados hacia la primera cámara (Figura 7).



**FIGURA 7 CÁMARA DE CONTACTO CON DIFUSOR POROSO DE BURBUJAS FINAS (IZQUIERDA), CÁMARA DE CONTACTO TIPO KERAG (DERECHA).**

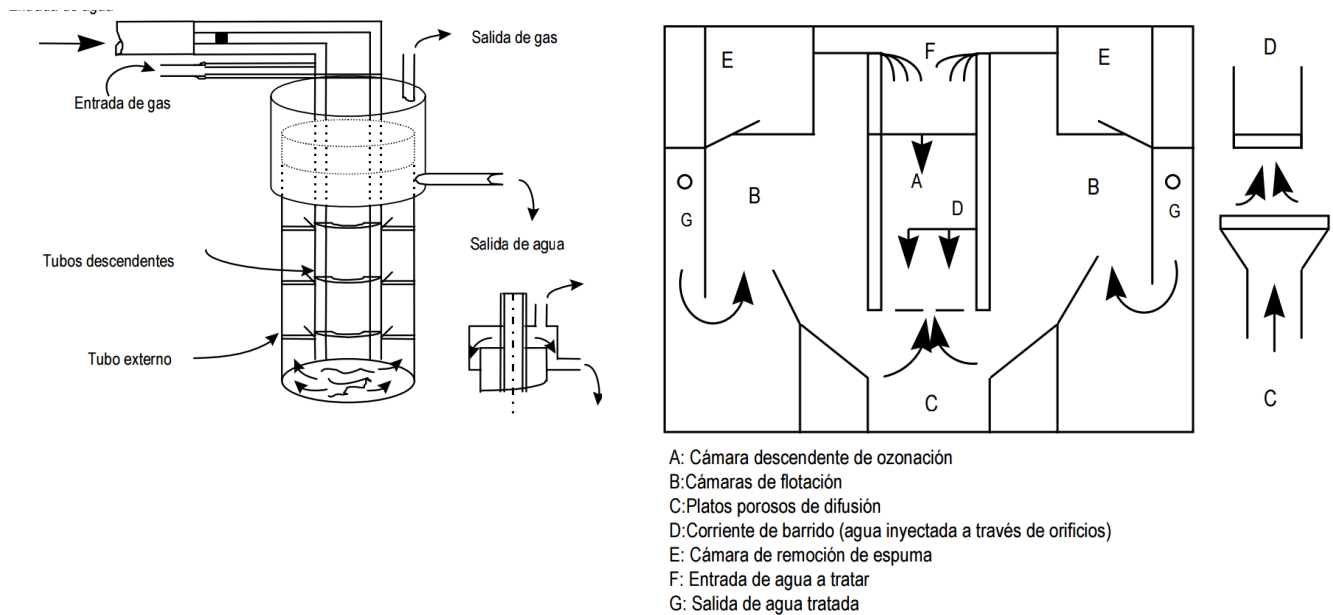
Fuente: CONAGUA, 2000.

- Sistema de contacto y difusión en tubo profundo en "U": consta de dos tubos concéntricos (Figura 8). El ozono se inyecta a través de un orificio ubicado en la parte superior del tubo interno. El agua fluye por éste y regresa en

dirección ascendente por el tubo externo, describiendo una trayectoria en "U" (CONAGUA, 2000).

- Cámara de contacto con difusor de plato poroso: este sistema se usa para combinar la ozonación y la flotación en una sola unidad (Figura 8). Consta de un tanque de contacto dividido en dos, una parte para la ozonación y la otra para la flotación. El agua fluye hacia abajo, por el centro de la cámara, y el ozono es introducido a través de un difusor de plato poroso localizado cerca del fondo (CONAGUA, 2000).

**FIGURA 8 SISTEMA DE CONTACTO Y DIFUSIÓN EN TUBO PROFUNDO EN "U" (IZQUIERDA), CÁMARA DE CONTACTO CON DIFUSOR DE PLATO POROSO (DERECHA)**



Fuente: CONAGUA, 2000.

- Sistema tipo Venturi: es muy económico pero su aplicación se limita a pequeñas instalaciones. Presenta inconvenientes por corrosión, sobresaturación por oxígeno y nitrógeno y necesidad de desgasamiento (CONAGUA, 2000).

#### 3.4.2.4 DESTRUCCIÓN DEL OZONO

Debido a que la eficiencia de transferencia del ozono es menor al 100% y a que éste no puede ser descargado directamente a la atmósfera por ser contaminante, es necesario destruirlo (Bryant *et al*, 1992).

Existen tres formas de eliminar el ozono (Geering, 1995):

- Térmica: Consiste en incrementar la temperatura entre 300 y 350 °C durante 5 segundos. A esta temperatura la vida media del ozono es de sólo 0.04 a 0.4 segundos (Manley y Niegowski, 1967).
- Catalítica: Emplea catalizadores de paladio, manganeso u óxidos de níquel soportados. Estos catalizadores pueden ser regenerados. El principal problema es la disposición de los catalizadores gastados.
- Adsorción en carbón activado: El ozono reacciona con carbón activado seco generando una cantidad considerable de calor que destruye el ozono y se consume lentamente. Esta combustión resulta en la formación de partículas finas de carbón que son explosivas, por lo que el método es peligroso y difícil de monitorear (U.S. EPA, 1986).

#### 4. METODOLOGÍA

La metodología empleada en el presente trabajo de investigación se dividió en cuatro etapas de acuerdo a las actividades desarrolladas.

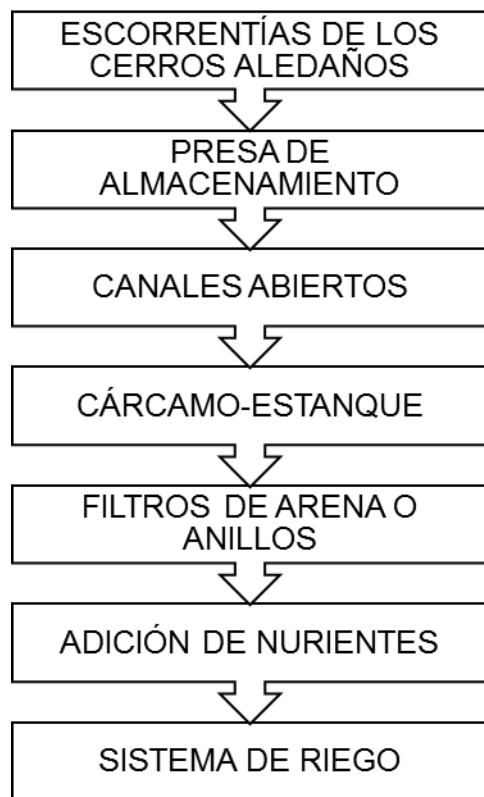
1. MUESTREO: Recolección de muestras de agua proveniente de los diferentes sitios de interés para determinar su calidad fisicoquímica y microbiológica, así como llevar a cabo pruebas de desinfección con ozono.
2. CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO: Determinación de la calidad fisicoquímica y microbiológica de las muestras de agua recolectadas de acuerdo a métodos estandarizados.
3. FILTRACIÓN: Evaluación de la etapa previa a la desinfección empleada en los sitios de interés, así como de otras posibles alternativas. Así mismo se evaluaron dos diferentes sistemas de filtración para la remoción de huevos de *Meloidogyne enterolobii*.
4. DESINFECCIÓN: Ensayos de desinfección con ozono tanto en muestras sintéticas como en muestras reales para los microorganismos de interés.

## 4.1 MUESTREO

Se llevaron a cabo tres muestreos en el norte del país en cuatro diferentes sitios agrícolas, denominados por cuestiones de confidencialidad AG1, AG2, AG3 y AG4, dedicados al cultivo de hortalizas en los cuales se ha reportado la presencia de agallas en plantas causadas por *Meloidogyne enterolobii*, un nematodo fitoparásito.

Los muestreos se realizaron en las siguientes fechas:

- 25 y 26 de mayo de 2016 (Época de estiaje).
- 5 y 6 de septiembre de 2016 (Época de lluvias).
- 13 y 14 de febrero de 2017 (Época de estiaje).



**FIGURA 9 CICLO DEL AGUA EMPLEADA EN LA IRRIGACIÓN**

La Figura 9 muestra el ciclo que sigue el agua empleada para irrigación en los 4 sitios de interés.

Se recolectaron muestras del cárcamo-estanque y después del sistema de filtración en cada sitio de interés para determinar la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua, la cantidad de huevos de nematodo y llevar a cabo pruebas de desinfección con ozono.

Las muestras destinadas para la determinación de la calidad del agua y las pruebas de desinfección con ozono se recolectaron en envases de polietileno de boca ancha con tapa hermética, perfectamente limpios y libres de cualquier residuo químico.

Para la recolección de las muestras destinadas a la determinación de huevos de nematodo se tomó como base la metodología de la NMX-AA-113-SCFI-2012, recolectando 200 L de muestra y tamizándolos en continuo a través de tamices de diferente tamaño de malla: 500  $\mu\text{m}$ , 325  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$  y 25  $\mu\text{m}$ . El concentrado del último tamiz, aproximadamente 40 mL, se transfirió a tubos Corning de 50 mL.

Todas las muestras recolectadas fueron preservadas en hieleras a una temperatura aproximada de 4 °C.

Por causas de fuerza mayor no en todos los muestreos fue posible recolectar muestra en los diferentes sitios de estudio, ya fuera filtrada o sin filtrar.

#### 4.2 CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO

La determinación de la calidad fisicoquímica y microbiológica de las diferentes muestras de agua recolectadas se llevó a cabo dentro de las 72 horas posteriores a la recolección de estas.

Los parámetros fisicoquímicos analizados así como las técnicas empleadas se muestran en la Tabla 5.

**TABLA 5 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS ANALIZADOS Y TÉCNICAS ANALÍTICAS EMPLEADAS**

<b>Parámetro</b>	<b>Técnica</b>
pH	Método potenciométrico <sup>1</sup>
DQO	Método de digestión de reactor <sup>2</sup>
DBO <sub>5</sub>	Medición de DBO por autocontrol con OxiTop
Sólidos Suspendidos Totales	Sólidos totales en suspensión secados a 103-105 °C <sup>1</sup>
Nitrógeno Amoniacal	Método titulométrico posterior a la destilación <sup>1</sup>
Fósforo Total	Método de PhosVer 3; digestión con persulfato ácido <sup>2</sup>
Alcalinidad	Método de titulación. Titulación potenciométrica a pH preseleccionado <sup>1</sup>

1. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA-AWWA-WEF.

2. Manual de análisis de agua. HACH COMPANY.

Los parámetros microbiológicos analizados así como las técnicas analíticas empleadas se muestran en la Tabla 6.

**TABLA 6 PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS ANALIZADOS Y TÉCNICAS ANALÍTICAS EMPLEADAS**

<b>Parámetro</b>	<b>Técnica</b>
Bacterias coliformes fecales	Procedimiento de filtro de membrana para coliformes fecales <sup>1</sup>
Hongos	Técnica de filtro de membrana <sup>1</sup>
Huevos de nematodo <i>Meloidogyne enterolobii</i>	Método de prueba <sup>2</sup>

1. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA-AWWA-WEF.

2. NMX-AA-113-SCFI-2012. Norma Mexicana.



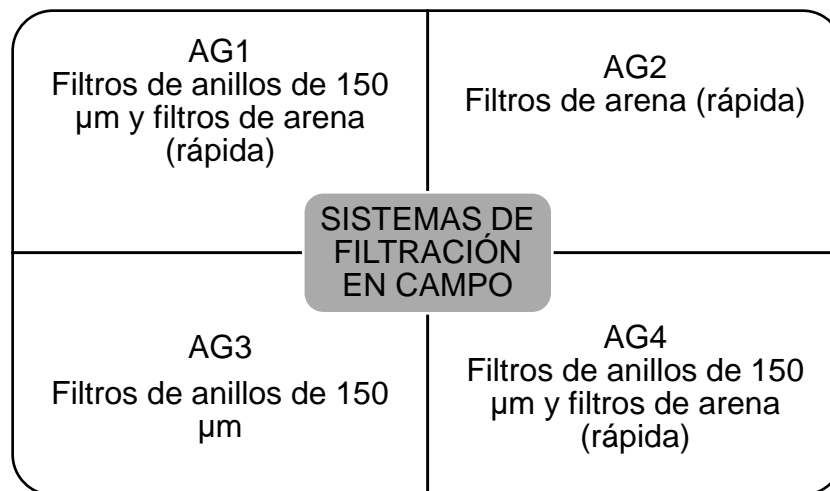
### 4.3 FILTRACIÓN

El proceso de filtración, como etapa previa a la desinfección con ozono, se evaluó de dos formas: a partir de su eficiencia en campo para la remoción de los diferentes parámetros analizados y su eficiencia a nivel laboratorio para la remoción de huevos de nematodo *Meloidogyne enterolobii*.

#### 4.3.1 COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE FILTRACIÓN EMPLEADOS EN CAMPO

Actualmente el tratamiento al que se somete el agua empleada en la irrigación en los puntos de interés consiste en un sistema de filtración. Los diferentes sistemas de filtración empleados dependiendo el punto de muestreo se observan en la Figura 10.

Se comparó la eficiencia de los diferentes sistemas de filtración analizando la calidad del agua antes y después de esta etapa, con el fin de observar cómo funciona cada tipo de sistema de filtración y si existe algún sistema que sea más eficiente que otro.



**FIGURA 10 DIFERENTES SISTEMAS DE FILTRACIÓN EMPLEADOS EN LOS SITIOS DE INTERÉS**

Adicionalmente se evaluó un tercer sistema de filtración (a nivel laboratorio), filtro de anillos de 100  $\mu\text{m}$ . Para esto se hicieron pasar muestras recolectadas en campo antes del sistema de filtración a través de un filtro de anillos de 100  $\mu\text{m}$ . Las muestras sometidas a este proceso fueron:

- Primer muestreo: AG2.
- Segundo muestreo AG2 y AG4.

Se decidió emplear estas muestras ya que al momento de realizar el muestreo correspondiente el sistema de filtración que emplean normalmente no se encontraba en funcionamiento, por lo que únicamente se pudo recolectar muestra antes del proceso de filtración.

#### 4.3.2 EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE FILTRACIÓN EN LA REMOCIÓN DE HUEVOS DE *Meloidogyne enterolobii*

Se evaluaron dos sistemas de filtración a nivel laboratorio para evaluar la remoción de huevos de *Meloidogyne enterolobii*.

- Filtro de anillos de 100  $\mu\text{m}$ .
- Filtro de anillos de 50  $\mu\text{m}$ .

Para llevar a cabo la evaluación de ambos sistemas de filtración, se montó un sistema que consistió en: tanque de almacenamiento (lado izquierdo Figura 11), bomba SIEMENS de 0.5 hp, válvula de globo, sistema de filtración (100 o 50  $\mu\text{m}$ ) y un tanque receptor (lado derecho Figura 11), como se muestra en la Figura 11.



**FIGURA 11 SISTEMA DE FILTRACIÓN EMPLEADO EN PRUEBAS DE REMOCIÓN DE HUEVOS DE *MELOIDOGYNE ENTEROLOBII***

Los huevos de *Meloidogyne enterolobii* empleados en el presente trabajo, para esta y las pruebas de desinfección con ozono, fueron proporcionados por el INECOL. Se recibió un concentrado con los huevos de la especie *Meloidogyne enterolobii*, los cuales habían sido previamente identificados. A partir de la solución concentrada de huevos de nematodo *Meloidogyne enterolobii* (*he*) se prepararon soluciones con diferentes concentraciones de *he* con el fin de inocular la cantidad de *he* necesaria en cada caso.

El tanque de almacenamiento se llenó con solución salina (0.85% de NaCl) la cual se inoculó con *he* para alcanzar una concentración por litro de  $5 \pm 1$  *he*.

Se determinó la concentración de *he* por triplicado, empleando la metodología descrita en el punto 4.1 para determinación de huevos de nematodo con el fin de corroborar la concentración de la solución.

Las diferentes pruebas consistieron en hacer pasar la solución del tanque de almacenamiento a través de un sistema de filtración de 100 o 50 micras, empleando diferentes flujos al cambiar el porcentaje de abertura de la válvula empleada. Los flujos empleados para estas pruebas fueron de 75, 41 y 9  $L \text{min}^{-1}$ .

La solución filtrada fue almacenada en un tanque receptor, donde nuevamente se determinó por triplicado la cantidad de *he* que había por litro después de pasar a

través del sistema de filtración, empleando la metodología descrita en el punto 4.1 para determinación de huevos de nematodo.

#### 4.4 DESINFECCIÓN CON OZONO

Todas las pruebas de desinfección con ozono se llevaron a cabo en una unidad de oxidación, compuesta por un separador de aire (Airsep modelo AS-12, USA), un generador de ozono Labo 76 (Emery Trailigaz, USA), un medidor de flujo gas, una columna de burbujeo de vidrio de 1.2 L de capacidad y una unidad de destrucción catalítica de ozono (PCI Ozone & Control Systems Inc.) para su liberación segura al ambiente (Figura 12).

El gas que es alimentado al generador de ozono está compuesto por una corriente gaseosa enriquecida con oxígeno la cual se obtiene al pasar aire del medio ambiente a través del separador de aire, el cual concentra el oxígeno hasta en un 80% (vv<sup>-1</sup>). Esta corriente de alimentación a su vez está libre de humedad.

El generador de ozono funciona con un sistema de descarga de corona. Cuenta con controladores de voltaje, flujo gas y presión. A su vez cuenta con un sistema de enfriamiento con agua, para evitar que la producción de ozono disminuya.

Una vez que el ozono es generado, circula por un medidor de flujo para después entrar a la columna de burbujeo. La columna de burbujeo es de cristal, con 5cm de diámetro interno, 120 cm de altura y una capacidad de 1.2 L, además en el fondo de la columna cuenta con un difusor de vidrio poroso cuyo tamaño de poro es de 10 µm a través del cual es introducido el ozono a la columna.

El ozono no disuelto sale de la columna de burbujeo hacia una unidad destructora de ozono, para posteriormente expulsar aire libre de ozono a la atmósfera.

Durante las pruebas de desinfección con ozono se determinó la concentración de ozono presente en la fase gas (a la salida del generador de ozono y a la salida de la columna de burbujeo) y fase líquida (columna de burbujeo).

La concentración de ozono en fase gas se determinó mediante el método yodométrico, descrito en el Anexo 1. Por su parte la concentración de ozono en fase líquida se determinó por el método colorimétrico índigo (Bader and Hoigné), descrito en el Anexo 2.

Las pruebas de ozonación se llevaron a cabo a temperatura ambiente  $20\pm 2$  °C.

Debido a que los *he* se recibieron a mediados de julio de 2016, no se realizaron pruebas de desinfección con ozono en muestras reales recolectadas en el primer muestreo.



**FIGURA 12 COLUMNA DE BURBUJEO (IZQUIERDA), GENERADOR DE OZONO (DERECHA)**

#### 4.4.1 PRUEBAS DE DESINFECCIÓN CON OZONO EN MUESTRAS SINTÉTICAS

Debido al limitado volumen de muestra real con el que se podía contar, se llevaron pruebas preliminares de ozonación en muestras sintéticas.

Las muestras sintéticas consistieron en una solución salina al  $0.85\%$   $m\ m^{-1}$  de NaCl. A esta solución se le inoculó para tener una concentración de  $5\pm 1$  *he* por litro de solución.

Las primeras pruebas que se realizaron se hicieron a un flujo de gas de alimentación a la columna constante de  $1.25 \text{ Lmin}^{-1}$ , con una concentración de ozono en el gas de alimentación entre 9 y  $11 \text{ mgO}_3\text{L}^{-1}$  y empleando cuatro tiempos de contacto: 10, 15, 20 y 25 minutos. Cada prueba se realizó por triplicado.

Durante cada ensayo se monitorearon la concentración de ozono a la salida y la concentración de ozono residual en la fase líquida.

La concentración de ozono residual se monitoreo durante los primeros tiempos del ensayo, a uno, tres y cinco minutos. A partir del minuto cinco la concentración residual se monitoreo cada cinco minutos hasta que concluyera la prueba.

Por su parte, la concentración de ozono a la salida se monitoreo cada cinco minutos hasta el final de la prueba.

Una vez transcurrido el tiempo en cada ensayo, se añadió a la muestra ozonada tiosulfato de sodio de concentración 0.1 N para detener la reacción con el ozono aun presente en la fase líquida.

La muestra ozonada fue recuperada para su posterior análisis tamizándola a través de un tamiz de  $35 \mu\text{m}$ . A su vez la columna de burbujeo fue enjuagada con solución salina, este enjuague a su vez también se tamizó, recuperando el enjuague en tubos Corning de 50 mL.

Para comprobar la viabilidad de los organismos inoculados después de ser sometidos a la ozonación, las diferentes muestras recuperadas se dejaron en incubación durante 7 días, en condiciones de obscuridad y temperatura de  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Posterior al periodo de incubación se observó mediante microscopía óptica la presencia de huevos y larvas, así como el efecto del ozono sobre la estructura de los organismos.

El procedimiento descrito anteriormente fue el empleado para evaluar la viabilidad de los *he* en todas las pruebas realizadas, ya fuera con muestras sintéticas o muestras reales.

Con los resultados obtenidos de monitorear la concentración de ozono en fase gas y fase líquida se realizó el balance de materia para cada prueba de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$DOA = \frac{C_{ge} * Q_g * t}{V_r}$$

$$DOT = \frac{Q_g * (C_{ge} - C_{gs}) * t}{V_r}$$

$$DOC = \frac{Q_g * (C_{ge} - C_{gs}) * t}{V_r} - C_R$$

$$ET = \frac{C_{ge} - C_{gs}}{C_{ge}} * 100$$

$$Ct = C_R * t$$

DOA Dosis aplicada de ozono (mgL<sup>-1</sup>)

DOT Dosis de ozono transferida (mgL<sup>-1</sup>)

DOC Dosis de ozono consumida (mgL<sup>-1</sup>)

ET Eficiencia de transferencia (%)

C<sub>ge</sub> Concentración de ozono en fase gas a la entrada de la columna (mgL<sup>-1</sup>)

C<sub>gs</sub> Concentración de ozono en fase gas a la salida de la columna (mgL<sup>-1</sup>)

C<sub>R</sub> Concentración de ozono en la fase líquida (mgL<sup>-1</sup>)

Q<sub>g</sub> Flujo de gas ozono (Lmin<sup>-1</sup>)

V<sub>r</sub> Volumen del reactor (L)

t Tiempo de ozonación (min)

El balance de materia de ozono se hizo con el fin de observar bajo qué condiciones (dosis de ozono transferida, Ct) se lograba la inactivación de los organismos inoculados. Este balance se realizó en las pruebas posteriores tanto en muestras sintéticas como muestras reales.

Las siguientes pruebas con muestras sintéticas se realizaron probando diferentes flujos de gas a la entrada de la columna de burbujeo y tiempos de ozonización menores. Los flujos empleados para estas pruebas fueron de 0.5, 0.75 y 1 Lmin<sup>-1</sup>. Mientras que la duración de las diferentes pruebas de ozonización realizadas fue de cinco y diez minutos. Cada flujo se probó para ambos tiempos, realizando las pruebas por triplicado.

Al final de cada prueba se realizó el procedimiento descrito previamente para la recuperación de la muestra, viabilidad de los organismos después del proceso de ozonización y balance de materia de ozono.

#### 4.4.2 PRUEBAS DE DESINFECCIÓN CON OZONO EN MUESTRAS REALES

##### 4.4.2.1 PRUEBAS DE DESINFECCIÓN CON OZONO EN MUESTRAS RECOLECTADAS EN EL SEGUNDO MUESTREO

Las muestras recolectadas durante el segundo muestreo (5 y 6 de septiembre de 2016) se ozonaron bajo diferentes condiciones de tiempo de contacto y flujo de gas.

Por una parte, la ozonación de la AG2FIL, AG3FIL y AG4FIL se llevó a cabo empleando un flujo de gas de entrada de 1.25 Lmin<sup>-1</sup> y un tiempo de contacto de 10 minutos.

Mientras que la AG1FIL se ozonó bajo condiciones de flujos de gas de entrada de 0.5 y 0.75 Lmin<sup>-1</sup> y un tiempo de contacto de 10 minutos.

Una vez transcurrido el tiempo en cada prueba, se empleó el procedimiento descrito en el punto 4.4.1 para la recuperación de la muestra y la evaluación de la viabilidad de los organismos inoculados. Adicionalmente a esto se analizó la presencia de bacterias indicadoras de contaminación fecal y hongos en las muestras ozonadas de acuerdo a la metodología descrita en la Tabla 6.

Se realizó el balance de materia de cada prueba realizada de acuerdo al procedimiento descrito en el punto 4.4.1 para ver las condiciones obtenidas (dosis de ozono transferida y Ct) al emplear muestras reales.



#### 4.4.2.2 PRUEBAS DE DESINFECCIÓN CON OZONO EN MUESTRAS RECOLECTADAS DURANTE EL TERCER MUESTREO

Todas las muestras filtradas recolectadas durante el tercer muestreo (13 y 14 de febrero de 2017) se ozonaron bajo las mismas condiciones.

Se emplearon dos flujos de gas de 0.5 y 0.75 Lmin<sup>-1</sup> y un tiempo de contacto de 10 minutos.

Las muestras fueron recuperadas y analizadas siguiendo el procedimiento descrito en el punto 4.4.1. Se evaluó la presencia de bacterias indicadoras de contaminación fecal y hongos en las muestras ozonadas de acuerdo a la metodología descrita en la Tabla 6.

El balance de materia de cada prueba realizada de acuerdo al procedimiento descrito en el punto 4.4.1 para ver las condiciones obtenidas (dosis de ozono transferida y Ct).

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 5.1 CALIDAD DE AGUA DE RIEGO

En la Tabla 7 y Tabla 8 se muestran los resultados de los diferentes parámetros fisicoquímicos y microbiológicos respectivamente, antes y después del sistema de filtración.

Para esta parte se analizó la calidad del agua de riego posterior al sistema de filtración, que es el agua empleada en la irrigación de los cultivos y la que se sometería al proceso de desinfección con ozono. Para esto se empleó como base la NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Esta norma a su vez hace referencia la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales; ya que está hace mención de los límites máximos permisibles para contaminantes básicos y metales pesados que debe de tener el agua empleada en el riego agrícola dependiendo su procedencia (ríos o embalses naturales y artificiales). Es importante mencionar que el agua de riego empleada en los sitios de estudio no es agua residual, si no como se muestra en la Figura 9, se trata de agua de escorrentías.

El parámetro de pH no presenta variaciones significativas de un muestreo a otro, en general se mantuvo ligeramente alcalino para todas las muestras analizadas. Este valor se encuentra dentro de lo establecido por la legislación mexicana. El contar con un pH de este tipo puede indicar que al momento de la ozonación se ve favorecida la oxidación indirecta sobre la oxidación directa.

**TABLA 7 RESULTADOS DE LA CALIDAD FISICOQUÍMICA D LAS DIFERENTES MUESTRAS RECOLECTADAS**

	pH		Nitrógeno amoniacal (mgNH <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )		Fósforo Total (mgPO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> L <sup>-1</sup> )		Alcalinidad (mgCaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )		SST (mgL <sup>-1</sup> )		DQO (mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )		DBO5 (mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	
	ENT	FIL	ENT	FIL	ENT	FIL	ENT	FIL	ENT	FIL	ENT	FIL	ENT	FIL
<b>PRIMER MUESTREO (MAYO)</b>														
<b>AG1</b>	7.06	7.26	0.56	0.42	0.44	0.55	65	60	4	6	29.70	10.33	7	5
<b>AG2</b>	7.47	7.35*	1.12	0.42*	1.35	0.88*	54	66*	77	51*	51.70	12.50*	7	NA
<b>AG3</b>	7.72	7.68	0.56	0.42	0.76	0.53	43	46	103	88	57	7	9	5
<b>AG4</b>	7.91	7.82	0.56	0.42	0.65	0.62	63	60	78	90	22	9	13	3
<b>SEGUNDO MUESTREO (SEPTIEMBRE)</b>														
<b>AG1</b>	7.86	8.02	0.34	0.28	1.99	1.93	46.7	43.3	12	9.5	126	122.50	11	8
<b>AG2</b>	7.77	7.65*	0.28	0.26*	2.48	1.61*	50	48.40*	191.50	150.00*	123	115.00*	4	NA
<b>AG3</b>	7.36	7.37	0.34	0.31	2.42	1.79	46	44.30	178.50	129	103.50	116.50	6	4
<b>AG4</b>	7.15	7.48*	0.34	0.28*	1.50	1.20*	36.7	34.00*	126.50	119.00*	98	96.00*	8	NA
<b>TERCER MUESTREO (FEBRERO)</b>														
<b>AG1</b>	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
<b>AG2</b>	7.79	8.06	1.12	17.64	7.31	12.63	64	53	105	85	19.5	53.50	7	4
<b>AG3</b>	7.84	7.84	3.08	0.56	1.58	1.29	68	68	145	125	19	21	8	5
<b>AG4</b>	7.68	7.79	3.08	2.24	1.64	1.16	75	73	125	115	25	20.5	6	4

\*Resultados obtenidos al filtrar las muestras a través de filtros de anillos de 100 micras en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería.

ENT: Entrada al filtro; FIL: Efluente filtrado

NA: No Analizado

**TABLA 8 RESULTADOS DE LA CALIDAD MICROBIOLÓGICA DE LAS DIFERENTES MUESTRAS RECOLECTADAS**

	CF (UFC100mL <sup>-1</sup> )		Huevos y larvas <i>Meloidogyne enterolobii</i> en 200L después de filtros	
	ENT	FIL	Huevos	Larvas
<b>ÉPOCA DE ESTIAJE (MAYO)</b>				
<b>AG1</b>	40.00E+04	0.21E+04	1	0
<b>AG2</b>	500.00E+04	NA	0	11
<b>AG3</b>	600.00E+04	0.40E+04	1	8
<b>AG4</b>	100.00E+04	0.30E+04	2	4
<b>ÉPOCA DE LLUVIAS (SEPTIEMBRE)</b>				
<b>AG1</b>	31.00E+04	20.00E+04	0	0
<b>AG2</b>	400.00E+04	390.00E+04	0	0
<b>AG3</b>	70.00E+04	21.00E+04	4	0
<b>AG4</b>	28.00E+04	26.00E+04	4	0
<b>ÉPOCA DE ESTIAJE (FEBRERO)</b>				
<b>AG1</b>	NA	NA	NA	NA
<b>AG2</b>	30.00E+04	16.00E+04	5	2
<b>AG3</b>	10.00E+04	6.00E+04	9	2
<b>AG4</b>	3.00E+04	0.20E+04	11	2

NA= No Analizado

Tanto el nitrógeno amoniacal como el fósforo son nutrientes que se pueden encontrar de forma natural en el agua de riego y son de los principales nutrientes para los cultivos. Debido a la forma en la que están presentes (NH<sub>3</sub> y PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), ambos pueden oxidarse en la presencia de ozono.

Para el primer y segundo muestreo ambos parámetros se encuentran en concentraciones muy bajas, indicando por una parte que se requiere la adición de nutrientes para un buen desarrollo del cultivo, ya que el agua empleada no cuenta con la cantidad suficiente de nutrientes, y por otro lado que el impacto que ambos parámetros tendrán sobre la dosis de ozono requerida para llevar a cabo la desinfección de las muestras será mínimo o nulo.

Por su parte los resultados obtenidos para estos parámetros durante el tercer muestreo siguen la tendencia de los dos muestreos anteriores, salvo por la AG2, donde se observa un aumento significativo en el valor de ambos nutrientes antes y después del proceso de filtración, esto se debe a que al momento de tomar la muestra una vez filtrada, a esta ya se le habían añadido los fertilizantes empleados.

Para la desinfección con ozono no es deseable que se añadan los fertilizantes antes de llegar a esta etapa, ya que reaccionarían con el ozono aumentando la demanda de ozono del agua y haciendo que el nutriente no llegara en una forma biodisponible para el cultivo.

La alcalinidad, a pesar de no ser un parámetro regulado por la legislación mexicana vigente, nos proporciona una idea acerca de la interacción del agua con el fertilizante. Una alta alcalinidad produce un pH alto, afectando la biodisponibilidad de los nutrientes. La FAO recomienda un valor máximo de  $200 \text{ mgCaCO}_3\text{L}^{-1}$  para este parámetro, por lo que en todos los sitios de muestreo los valores obtenidos se encuentran dentro de este rango.

Los sólidos suspendidos totales (SST) en todos los casos, después del sistema de filtración, se encuentran por debajo del valor establecido por la legislación mexicana ( $150 \text{ mgL}^{-1}$ ). Sin embargo, para este parámetro si existe una diferencia significativa entre un punto y otro.

El sitio AG1 es el que menor cantidad de SST presenta, esto debido a su ubicación más cercana al comienzo del sistema de canales abiertos para la distribución del agua. Por lo que no recorre una gran distancia dentro del sistema de canales, arrastrando una mínima cantidad de sólidos.

Por su parte la AG2, AG3 y AG4 (sitios relativamente cercanos entre sí) presentan una cantidad mayor de SST. Este aumento se debe a que la distancia entre estos puntos y el inicio del sistema de canales abiertos es mayor, lo cual significa que el agua empleada recorre un trayecto más largo durante el cual el arrastre de sólidos a través de los canales se ve aumentado.

A su vez, también es importante resaltar el aumento particular que existe en los SST durante el segundo muestreo. Este muestreo se llevó a cabo durante la época de lluvias, por lo que la cantidad de sólidos arrastrados por estas se ve aumentada durante todo el trayecto que recorre el agua de acuerdo a la Figura 9.

La demanda química de oxígeno (DQO) es el parámetro más importante a considerar en un sistema de desinfección con ozono, a pesar de no estar normado por la legislación mexicana. Esto debido a que representa de manera global todo el material, orgánico e inorgánico, susceptible a ser oxidado. Siendo el ozono uno de los oxidantes más fuertes que existen, este reaccionará con todo este material oxidable.

Los resultados obtenidos varían significativamente para este parámetro dependiendo la época en que se realizó.

Para el primer muestreo los valores de DQO determinados en general indican una buena calidad del agua de acuerdo a CONAGUA (2011) que clasifica este parámetro como:

- $DQO \leq 10 \text{ mgO}_2\text{L}^{-1}$  como excelente.
- $10 < DQO \leq 20 \text{ mgO}_2\text{L}^{-1}$  como buena calidad.
- $20 < DQO \leq 40 \text{ mgO}_2\text{L}^{-1}$  como aceptable.
- $40 < DQO \leq 200 \text{ mgO}_2\text{L}^{-1}$  como contaminada.
- $DQO > 200 \text{ mgO}_2\text{L}^{-1}$  como fuertemente contaminada.

Durante el segundo muestreo la calidad del agua de acuerdo a esta misma clasificación pasa a ser contaminada. Esto puede deberse a que al ser temporada de lluvias y tratarse de una zona dedicada a la agricultura donde es común el uso de fertilizantes, así como de pesticidas, al aumentar la cantidad de lluvia estas sustancias que permanecen en el suelo pueden lixiviarse y ser arrastrados hasta los canales abiertos, donde pasan a ser distribuidos a través de toda la red de canales.

En el último muestreo la calidad del agua pasa a ser aceptable, y en general no varía mucho entre los diferentes sitios de muestreo. Sin embargo, para la AG2, se nota un aumento en este parámetro después del sistema de filtración, esto ya que como se mencionaba anteriormente para este punto se han añadido al agua los fertilizantes empleados lo cual también se ve reflejado en el valor de DQO.

Por último, el parámetro de DBO<sub>5</sub> en todas las muestras analizadas se encuentra dentro de lo establecido por la legislación mexicana, no variando mucho de un muestreo a otro ni de sitio a sitio. Esta materia susceptible a ser oxidada por medios biológicos la contempla la DQO, por lo que los valores tan bajos de DBO<sub>5</sub> indican que la mayor parte de la materia oxidable presente en las muestras no puede ser biodegradada.

Todas las muestras analizadas tanto antes como después de la filtración presentan una considerable contaminación fecal, no cumpliendo con la legislación mexicana. Esto es importante porque además de presentar un riesgo para la salud, afecta la cantidad de ozono necesaria para que se lleve a cabo la desinfección, ya que la desinfección se lleva a cabo también para estos microorganismos.

El microorganismo de interés, *Meloidogyne enterolobii*, se analizó para su etapa de huevo y de larva. Los resultados obtenidos varían considerablemente dependiendo del sitio de muestreo y de la época en la que se realizó.

A pesar de que en todos los casos el resultado obtenido cumple con lo que establece la legislación mexicana, es importante considerar dos aspectos. El primero es que los huevos de nematodo que toma en consideración la legislación de la norma son de nematodos patógenos para los seres humanos, mientras que en este estudio se trabajó con nematodos fitopatógenos.

El segundo aspecto es que a pesar de haber una baja concentración de huevos de *Meloidogyne enterolobii* en el agua de riego, los problemas causados por este patógeno siguen estando presentes en el cultivo. Debido a los altos flujos empleados para la irrigación, por lo que a pesar de haber una baja concentración de *he*, esta se está suministrando de manera constante a los sembradíos.

## 5.2 RESULTADOS DE FILTRACIÓN

### 5.2.1 RESULTADOS DE LA COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE FILTRACIÓN

En la Tabla 7 se observaron los resultados de la calidad de las distintas muestras recolectadas antes y después de someterse a los diferentes sistemas de filtración empleados en campo, así como para el sistema de filtración de anillos de 100  $\mu\text{m}$  empleado a nivel laboratorio.

En general la calidad fisicoquímica de las muestras después de someterse a cualquiera de los sistemas de filtrado, cumple con lo establecido en la legislación mexicana, salvo algunas excepciones que se discuten a continuación.

El sistema de filtración compuesto por filtros de anillos de 150 micras y filtros de arena (proceso consecutivo) mostró un aumento en la cantidad de SST para el primer muestreo. Esto puede deberse a que al ser una filtración rápida la que se lleva a cabo con los filtros de arena, cierta cantidad de sólidos presentes en el filtro pueden estarse transfiriendo al agua filtrada a través de los filtros de anillos de 150 micras, posiblemente por falta de mantenimiento ya que para los muestreos posteriores no se presenta este problema.

Los filtros de anillos de 100 micras, evaluados a nivel laboratorio, mostraron una buena remoción para los diferentes parámetros analizados, sin embargo, con cualquiera de los sistemas de filtración estudiados se cumple con la normatividad por lo que el uso de un sistema de filtración de anillos de un micraje menor no aporta un beneficio en cuanto a calidad del filtrado.

Para los filtros de arena, el aumento en los parámetros de nitrógeno amoniacal, fósforo total y DQO se debe a la adición de fertilizantes. Mientras que para los demás parámetros la disminución que se obtiene la calidad del filtrado es semejante.



El uso de filtros de anillos de 150 micras presenta remociones similares a las que se obtienen al emplear la combinación de este sistema con un sistema de filtración con arena ya que la calidad del filtrado es similar. Para el segundo y tercer muestreo se presenta un pequeño aumento para el parámetro de DQO, esto puede deberse a una falta de mantenimiento al equipo ya que este problema no está presente durante el primer muestreo.

5.2.2 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE FILTRACIÓN EN LA REMOCIÓN DE HUEVOS DE *Meloidogyne enterolobii*

Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas para la evaluación de los sistemas de filtración por anillos de 100 y 50  $\mu\text{m}$  a diferentes condiciones de flujo se muestran en la Tabla 9.

**TABLA 9 RESULTADOS DE PRUEBAS DE FILTRACIÓN PARA REMOCIÓN DE HUEVOS DE *MELOIDOGYNE ENTEROLOBII***

Filtro	Huevos de <i>Meloidogyne enterolobii</i> antes de la filtración (heL <sup>-1</sup> )	Flujo (Lmin <sup>-1</sup> )	Huevos de <i>Meloidogyne enterolobii</i> después del sistema de filtración (heL <sup>-1</sup> )	
Sin filtro (Blanco)	5±1	-	6	
			5	
			5	
55 $\mu\text{m}$		75		4
				5
				4
		41		4
				3
				3
		9		1
				1
				2
100 $\mu\text{m}$	75		5	
			5	
			6	
	41		5	
			5	
			5	
	9		5	
			4	
			5	

Se observa que el filtro de anillos de 100  $\mu\text{m}$ , sin importar el flujo, no logra retener los huevos de *Meloidogyne enterolobii*. Esto se debe a que como se puede observar en la Tabla 2 el tamaño de los huevos de este nematodo a lo ancho es se encuentra por debajo de las 100 micras mientras que el máximo largo de los huevos es de 104

micras, indicando que los huevos tienen un largo menor a las 100 micras o que están atravesando el filtro de manera vertical.

Por su parte los filtros de anillos de 55 micras muestran una mejor retención de los huevos de este nematodo la cual mejora mientras menor sea el flujo. La remoción por este sistema de filtración se debe a que el largo de los huevos, 85-105  $\mu\text{m}$  (Tabla 2), se encuentra por arriba del tamaño del filtro haciendo que la única manera de atravesar el filtro sea de manera vertical, lo cual aumenta a altos flujos.

A pesar de que el filtro de anillos de 55 micras logra la remoción de los huevos de *Meloidogyne enterolobii* el bajo flujo que se debe manejar para lograr esto no logra satisfacer las necesidades de riego que actualmente se tienen en los diferentes puntos de interés, además de que debido a la cantidad de SST con la que cuenta el agua utilizada podría requerirse un retrolavado de los filtros muy seguido con el fin de garantizar su buen funcionamiento y que estos no se tapen.

### 5.3 RESULTADOS DE PRUEBAS DE DESINFECCIÓN CON OZONO

#### 5.3.1 RESULTADOS DE PRUEBAS DE DESINFECCIÓN CON OZONO EN MUESTRAS SINTÉTICAS

En la Tabla 10, Tabla 11, Tabla 12 y Tabla 13 se muestran los resultados de las diferentes pruebas de desinfección con ozono realizadas en muestras sintéticas.

En las pruebas realizadas con un flujo de  $1.25 \text{ Lmin}^{-1}$  (Tabla 10) se observa que para todas las condiciones empleadas de tiempo de contacto y Ct se logra la inactivación de todos los *he* inoculados.

La condición de menor tiempo de contacto, 10 minutos, a la que corresponde un valor de Ct alrededor de  $25 \text{ mgO}_3\text{minL}^{-1}$  fue a partir de la cual se decidieron las condiciones a emplear en pruebas posteriores. Debido a que para las pruebas realizadas es la mínima condición de Ct y tiempo de contacto que cumple con la inactivación de los *he* inoculados.

Para las pruebas posteriores se emplearon flujos de alimentación de gas de entrada menores (Tabla 11, Tabla 12, Tabla 13) con el fin de disminuir la DOT y observar el efecto que esto tiene sobre la inactivación de los *he*. Así mismo, ya que se observó que la inactivación de los *he* puede llevarse a cabo a partir de un tiempo de contacto ozono-agua de 10 minutos se decidió emplear este tiempo y uno menor con el fin de observar que tanto se pueden disminuir el tiempo de contacto ozono-agua para obtener el mismo grado de desinfección.

Las pruebas realizadas los resultados obtenidos para un tiempo de contacto ozono-agua de 5 minutos (Tabla 11, Tabla 12, Tabla 13) muestran cierto grado de desinfección, sin embargo en ningún caso se logra la inactivación de todos los organismos inoculados. Para un tiempo de contacto ozono-agua de 5 minutos, bajo las condiciones de laboratorio trabajadas, debido a que la concentración residual de ozono en agua no es lo suficientemente alta no es posible obtener un Ct de  $25 \text{ mgO}_3\text{minL}^{-1}$ .

**TABLA 10 RESULTADOS DE PRUEBAS DE OZONACIÓN EN MUESTRAS SINTÉTICAS CON UN FLUJO DE 1.25 LMIN<sup>-1</sup>**

Tiempo (min)	C <sub>R</sub> prom	C <sub>t</sub>	DOT	Huevos viables inoculados	Después de la ozonación		
					Huevos viables	Huevos no viables	Larvas
10	2.33	23.30	22.81	5±1	0	5	0
	2.21	26.10	21.54		0	5	0
	2.42	25.20	20.65		0	5	0
15	2.74	41.10	24.31		0	4	0
	2.68	40.20	25.75		0	4	0
	2.55	38.25	26.19		0	5	0
20	2.77	55.40	37.75		0	5	0
	2.86	57.20	36.06		0	5	0
	2.88	57.60	37.13		0	5	0
25	2.95	73.75	43.91		0	4	0
	2.89	72.25	45.94		0	5	0
	2.94	73.50	42.81		0	5	0

C<sub>R</sub> en mgO<sub>3</sub>L<sup>-1</sup>

C<sub>t</sub> en mgO<sub>3</sub>minL<sup>-1</sup>

DOT en mgO<sub>3</sub>

La cantidad de huevos así como de larvas se reporta por litro

**TABLA 11 RESULTADOS DE PRUEBAS DE OZONACIÓN EN MUESTRAS SINTÉTICAS CON UN FLUJO DE 0.50 LMIN<sup>-1</sup>**

Tiempo (min)	C <sub>R</sub> prom	C <sub>t</sub>	DOT	Huevos viables inoculados	Después de la ozonación		
					Huevos viables	Huevos no viables	Larvas
5	1.70	8.50	5.10	5±1	2	1	1
	1.72	8.60	6.30		4	1	0
	1.77	8.85	5.53		3	0	2
	3.02	15.10	8.16		1	2	1
	3.05	15.25	8.32		3	1	0
	3.12	15.60	7.75		2	2	0
10	1.60	16.00	7.82		2	2	1
	1.66	16.60	7.90		2	2	0
	1.71	17.10	7.45		1	2	1
	2.64	26.40	11.70		0	5	0
	2.74	27.40	12.14		0	4	0
	2.88	28.80	12.30		0	5	0

C<sub>R</sub> en mgO<sub>3</sub>L<sup>-1</sup>

C<sub>t</sub> en mgO<sub>3</sub>minL<sup>-1</sup>

DOT en mgO<sub>3</sub>

La cantidad de huevos así como de larvas se reporta por litro

**TABLA 12 RESULTADOS DE PRUEBAS DE OZONACIÓN EN MUESTRAS SINTÉTICAS CON UN FLUJO DE 0.75 LMIN<sup>-1</sup>**

Tiempo (min)	C <sub>R</sub> prom	Ct	DOT	Huevos viables inoculados	Después de la ozonación		
					Huevos viables	Huevos no viables	Larvas
5	1.38	6.90	3.80	5±1	3	1	1
	1.42	7.10	5.66		2	1	1
	1.72	8.60	5.48		3	1	0
	2.84	14.20	7.23		1	2	1
	2.90	14.50	6.90		3	2	0
	2.94	14.70	7.16		2	2	1
10	1.59	15.90	11.40		1	3	1
	1.65	16.50	11.04		1	3	0
	1.76	17.60	10.97		2	2	1
	2.70	27.00	13.46		0	4	0
	2.72	27.20	13.58		0	5	0
	2.73	27.30	13.40		0	5	0

C<sub>R</sub> en mgO<sub>3</sub>L<sup>-1</sup>

Ct en mgO<sub>3</sub>minL<sup>-1</sup>

DOT en mgO<sub>3</sub>

La cantidad de huevos así como de larvas se reporta por litro

**TABLA 13 RESULTADOS DE PRUEBAS DE OZONACIÓN EN MUESTRAS SINTÉTICAS CON UN FLUJO DE 1.00 LMIN<sup>-1</sup>**

Tiempo (min)	C <sub>R</sub> prom	C <sub>t</sub>	DOT	Huevos viables inoculados	Después de la ozonación		
					Huevos viables	Huevos no viables	Larvas
5	0.78	3.90	5.70	5±1	4	1	1
	0.84	4.20	5.98		3	1	1
	0.92	4.60	6.85		2	1	1
	3.02	15.10	7.23		1	3	1
	3.07	15.35	7.56		0	3	1
	3.12	15.60	7.45		1	2	1
10	0.93	9.30	6.86		2	2	0
	0.94	9.40	6.50		1	2	1
	0.95	9.50	7.00		2	2	1
	2.64	26.40	11.70		0	5	0
	2.77	27.70	10.20		0	5	0
	2.88	28.80	12.30		0	4	0

C<sub>R</sub> en mgO<sub>3</sub>L<sup>-1</sup>

C<sub>t</sub> en mgO<sub>3</sub>minL<sup>-1</sup>

DOT en mgO<sub>3</sub>

La cantidad de huevos así como de larvas se reporta por litro



Las pruebas realizadas con un tiempo de contacto ozono-agua de 10 minutos (Tabla 11, Tabla 12, Tabla 13) mostraron diferentes grados de inactivación. Para aquellas donde las condiciones de laboratorio trabajadas permitieron obtener un valor de Ct por arriba de  $25 \text{ mgO}_3\text{minL}^{-1}$  se observó que se logra la inactivación de todos los *he* inoculados.

En el caso de las pruebas en muestras sintéticas la DOT representa la transferencia de ozono debida a la solubilidad de este mismo en el agua, tendiendo a alcanzar una concentración residual en el agua casi constante como resultado de la saturación con ozono de la misma.

Para estas pruebas, ya que la única demanda de ozono en las muestras es por los *he* inoculados, una baja DOT permite alcanzar y mantener cierta concentración residual de ozono durante el tiempo que dure la prueba. Por lo que los resultados obtenidos de estas pruebas sirven como base para el tiempo de contacto ozono-agua necesario para lograr la inactivación de todos los *he* inoculados, así como las mejores condiciones de flujo de gas de entrada a utilizar.

### 5.3.2 RESULTADOS DE PRUEBAS DE DESINFECCIÓN CON OZONO EN MUESTRAS REALES

Los resultados de todas las pruebas de desinfección con ozono realizadas con muestras reales se presentan en la Tabla , Tabla 14 y Tabla .

La Tabla presenta los resultados de las primeras pruebas llevadas a cabo en muestras reales empleando un flujo de  $1.25 \text{ Lmin}^{-1}$ , donde se ozonaron bajo este flujo las muestras recolectadas durante el muestreo del 5 y 6 de septiembre de 2016, correspondientes a los sitios AG2, AG3 y AG4.

Para estas primeras pruebas los valores de Ct que se obtuvieron son similares a los de la Tabla 10, sin embargo existe una gran diferencia entre la DOT obtenida en muestras sintéticas y muestras reales. Esto se debe a que, a diferencia de las muestras sintéticas, ozonadas bajo la condición de flujo de gas de entrada, la muestra real tiene una demanda de ozono por toda la carga de material oxidable en ella.

En la Tabla 7 donde se observó que las muestras recolectadas durante el 5 y 6 de septiembre de 2016 son las que presentan mayor cantidad de DQO y mayor cantidad de bacterias indicadoras de contaminación fecal. Debido a esto el ozono transferido al agua a su vez reacciona, por lo que para lograr alcanzar una concentración residual casi constante de ozono en el agua primero debe reaccionar toda, o casi toda, la materia oxidable presente.

Para estas pruebas debido al alto flujo de alimentación empleado ( $1.25 \text{ Lmin}^{-1}$ ) se logra satisfacer la demanda de ozono de las muestras y conseguir una concentración residual similar a la obtenida en la Tabla 10 consiguiendo así valores similares de Ct.

Por otra parte, las muestras recolectadas durante el muestreo del 5 y 6 de septiembre de 2016 correspondientes al sitio AG1FIL, se ozonaron bajo diferentes condiciones de flujo. Los resultados para este sitio se encuentran en la Tabla 14 y Tabla .

**TABLA 14 RESULTADOS DE PRUEBAS DE OZONACIÓN EN MUESTRAS REALES CON UN FLUJO DE 1.25 LMIN<sup>-1</sup>**

Agrícola	Tiempo (min)	C <sub>R</sub> prom	Ct	DOT	Huevos viables inoculados	Después de la ozonación			Coliformes fecales (UFC100mL <sup>-1</sup> )		Hongos	
						Huevos viables	Huevos no viables	Larvas	Antes de la ozonación	Después de la ozonación	Antes de la ozonación	Después de la ozonación
AG2FIL	10	2.23	22.30	98.12	5±1	0	4	0	3.90E+06	ND	Presencia	Ausencia
AG2FIL		2.03	20.30	95.20		0	5	0	3.90E+06	ND	Presencia	Ausencia
AG2FIL		2.16	21.60	93.15		0	3	0	3.90E+06	ND	Presencia	Ausencia
AG2FIL		2.19	21.90	94.50		0	5	0	3.90E+06	ND	Presencia	Ausencia
AG3FIL		2.65	26.50	98.75		0	4	0	2.10E+05	ND	Presencia	Ausencia
AG3FIL		2.73	27.30	92.25		0	4	0	2.10E+05	ND	Presencia	Ausencia
AG3FIL		2.57	25.70	98.50		0	5	0	2.10E+05	ND	Presencia	Ausencia
AG3FIL		2.62	26.20	99.37		0	3	0	2.10E+05	ND	Presencia	Ausencia
AG4FIL		2.35	23.50	94.58		0	5	0	2.60E+05	ND	Presencia	Ausencia
AG4FIL		2.46	24.60	90.00		0	5	0	2.60E+05	ND	Presencia	Ausencia
AG4FIL		2.64	26.40	90.00		0	5	0	2.60E+05	ND	Presencia	Ausencia
AG4FIL		2.27	22.70	95.75		0	4	0	2.60E+05	ND	Presencia	Ausencia

C<sub>R</sub> en mgO<sub>3</sub>L<sup>-1</sup>

Ct en mgO<sub>3</sub>minL<sup>-1</sup>

DOT en mgO<sub>3</sub>

La cantidad de huevos así como de larvas se reporta por litro

ND= No Detectado

**TABLA 14 RESULTADOS DE PRUEBAS DE OZONACIÓN EN MUESTRAS REALES CON UN FLUJO DE GAS DE 0.50 LMIN<sup>-1</sup>**

Agrícola	Tiempo (min)	C <sub>R</sub> prom	Ct	DOT	Huevos viables inoculados	Después de la ozonación			Coliformes fecales (UFC100 mL <sup>-1</sup> )		Hongos	
						Huevos viables	Huevos no viables	Larvas	Antes de la ozonación	Después de la ozonación	Antes de la ozonación	Después de la ozonación
AG1FIL	10	1.28	12.80	71.52	5±1	0	5	0	2.00E+05	ND	Presencia	Ausencia
AG1FIL		1.31	13.10	70.60		0	4	0	2.00E+05	ND	Presencia	Ausencia
AG1FIL		1.27	12.70	71.14		0	5	0	2.00E+05	ND	Presencia	Ausencia
AG2FIL		0.13	1.30	24.40		0	5	0	1.60E+05	ND	Presencia	Ausencia
AG2FIL		0.15	1.50	24.50		0	5	0	1.60E+05	ND	Presencia	Ausencia
AG2FIL		0.14	1.40	27.40		0	5	0	1.60E+05	ND	Presencia	Ausencia
AG3FIL		1.64	16.40	12.56		0	5	0	6.00E+04	ND	Presencia	Ausencia
AG3FIL		1.40	14.00	12.40		0	4	0	6.00E+04	ND	Presencia	Ausencia
AG3FIL		1.33	13.30	12.90		0	5	0	6.00E+04	ND	Presencia	Ausencia
AG4FIL		0.77	7.70	14.80		0	4	0	2.00E+03	ND	Presencia	Ausencia
AG4FIL		1.20	12.00	15.40		0	4	0	2.00E+03	ND	Presencia	Ausencia
AG4FIL		1.20	12.00	12.80		0	5	0	2.00E+03	ND	Presencia	Ausencia

C<sub>R</sub> en mgO<sub>3</sub>L<sup>-1</sup>

Ct en mgO<sub>3</sub>minL<sup>-1</sup>

DOT en mgO<sub>3</sub>

La cantidad de huevos así como de larvas se reporta por litro

ND= No Detectado

**TABLA 16 RESULTADOS DE PRUEBAS DE OZONACIÓN EN MUESTRAS REALES CON UN FLUJO DE GAS DE 0.75 LMIN<sup>-1</sup>**

Agrícola	Tiempo (min)	C <sub>R</sub> prom	Ct	DOT	Huevos viables inoculados	Después de la ozonación			Coliformes fecales (UFC100mL <sup>-1</sup> )		Hongos	
						Huevos viables	Huevos no viables	Larvas	Antes de la ozonación	Después de la ozonación	Antes de la ozonación	Después de la ozonación
AG1FIL	10	1.01	10.10	72.30	5±1	0	5	0	2.00E+05	ND	Presencia	Ausencia
AG1FIL		1.10	11.00	70.10		0	5	0	2.00E+05	ND	Presencia	Ausencia
AG1FIL		1.17	11.70	72.00		0	4	0	2.00E+05	ND	Presencia	Ausencia
AG2FIL		0.39	3.90	29.10		0	4	0	1.60E+05	ND	Presencia	Ausencia
AG2FIL		0.44	4.40	27.80		0	4	0	1.60E+05	ND	Presencia	Ausencia
AG2FIL		0.41	4.10	27.60		0	4	0	1.60E+05	ND	Presencia	Ausencia
AG3FIL		0.94	9.40	11.40		0	5	0	6.00E+04	ND	Presencia	Ausencia
AG3FIL		0.94	9.40	10.70		0	5	0	6.00E+04	ND	Presencia	Ausencia
AG3FIL		0.96	9.60	11.30		0	5	0	6.00E+04	ND	Presencia	Ausencia
AG4FIL		1.13	11.30	15.40		0	5	0	2.00E+03	ND	Presencia	Ausencia
AG4FIL		1.27	12.70	16.30		0	5	0	2.00E+03	ND	Presencia	Ausencia
AG4FIL		1.15	11.50	19.00		0	4	0	2.00E+03	ND	Presencia	Ausencia

C<sub>R</sub> en mgO<sub>3</sub>L<sup>-1</sup>

Ct en mgO<sub>3</sub>minL<sup>-1</sup>

DOT en mgO<sub>3</sub>

La cantidad de huevos así como de larvas se reporta por litro

ND= No Detectado

Se observa que, para una carga de materia oxidable similar (DQO y bacterias indicadoras de contaminación fecal) al bajar el flujo de gas de entrada durante el tiempo de contacto ozono-agua la DOT es menor, al igual que la concentración promedio de ozono residual. Esto se debe a que al reducir el flujo de gas de entrada la cantidad de ozono que ingresa al sistema durante un mismo periodo de tiempo (10 minutos) se reduce considerablemente, por lo que no hay la misma cantidad de ozono que puede transferirse disminuyendo a su vez la concentración de ozono residual que es posible lograr.

Es por esto que para este caso el valor de Ct no es el mismo que en los casos anteriores, sin embargo, aun así, se logra la inactivación de todos los organismos ya presentes en la muestra y de los *he* inoculados por la cantidad de ozono transferida.

Las muestras recolectadas durante el 13 y 14 de febrero de 2017 de los sitios AG2, AG3 y AG4 fueron ozonadas bajo las condiciones de la Tabla 14 y Tabla . Al igual que ocurrió con la AG1 los valores de Ct y de DOT son diferentes a los obtenidos al ozonar muestras sintéticas bajo las mismas condiciones (Tabla 12 y Tabla 13) y a su vez de los resultados de la AG1FIL.

La diferencia con los resultados obtenidos en muestras sintéticas de igual manera se debe a la demanda de ozono de las diferentes muestras, mientras que la diferencia que existe entre la AGFIL1 del segundo muestreo, ozonada bajo las mismas condiciones, se debe a la diferencia que existen entre las muestras en la cantidad de materia oxidable en cada una. Esto se puede ver en los valores de DQO en la Tabla 7 y la cantidad de bacterias coliformes fecales en la Tabla 8.

Mientras que una muestra presente mayor contaminación (AG1FIL, segundo muestreo) se tendrá una mayor demanda de ozono, obteniéndose mayores valores de DOT y valores de Ct menores a los obtenidos al ozonar muestras sintéticas bajo las mismas condiciones.

De estos últimos resultados destacan los obtenidos en la AG2FIL, ya que es en los que se obtuvo menor valor de Ct y concentración residual promedio de ozono.

Incluso estos resultados se encuentran por debajo de los de la AG1FIL que presenta mayores valores de DQO.

Estos resultados pueden deberse al tipo de material oxidable presente en esta muestra en específico. En la Tabla 7 se observó que la AG2FIL del muestreo del 13 y 14 de febrero de 2017 es la única que presenta altas concentraciones de nitrógeno amoniacal y fósforo total.

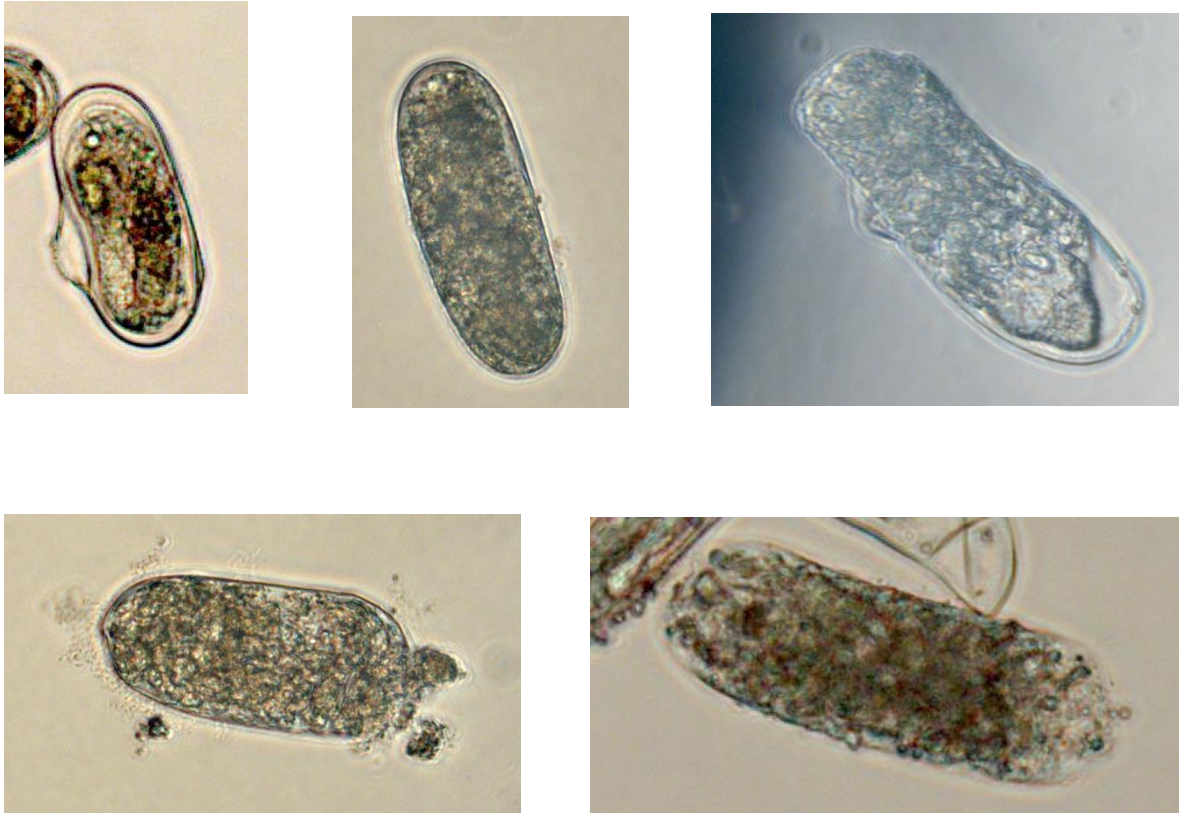
El alza en estos parámetros antes y después de la filtración se debe a la adición de fertilizantes. Es posible que la interacción entre el ozono y este tipo de compuestos sea responsable de los resultados obtenidos, puesto que el valor de DOT es superior al de las otras dos agrícolas recolectadas en el mismo muestreo, lo que indica que durante el mismo periodo de tiempo se transfirió más ozono para la AG2FIL, sin embargo, la demanda de ozono de la muestra a diferencia de los otros casos no permite que se alcance una concentración residual promedio de ozono lo suficientemente alta.

Para todas las pruebas realizadas se observó la acción desinfectante del ozono sobre las bacterias indicadoras de contaminación fecal y los hongos, organismos que ya se encontraban en las muestras, así como el efecto que tuvo el ozono sobre los *he*.

A continuación, se muestran algunas de las fotos que se obtuvieron al observar mediante microscopía óptica las muestras ozonadas, en las cuales se puede apreciar el efecto que el ozono tiene sobre estos organismos.



**FIGURA 13 HUEVO DE MELOIDOGYNE ENTEROLOBII VIABLE (IZQUIERDA, AUMENTO 40X) Y LARVA DE MELOIDOGYNE ENTEROLOBII (DERECHA, AUMENTO 40X)**



**FIGURA 14 HUEVOS DE MELOIDOGYNE ENTEROLOBII EN ESTADO NO VIABLE DEBIDO AL PROCESO DE OZONACIÓN (AUMENTO 40X)**

Como se observa en la Figura 13 los huevos de *Meloidogyne enterolobii* en estado viable presentan una pared bien definida, sin daño alguno en su estructura externa o interna. De igual manera se puede distinguir la larva en su interior (en desarrollo).

Por otra parte, en los *he* sometidos al proceso de ozonación se pueden apreciar daños como resultado de la exposición al ozono (Figura 14). La membrana, antes uniforme, ahora presenta deformaciones, daños y en casos muy extremos, si el daño es mucho, el contenido del *he* queda expuesto al exterior, dejando al *he* en cualquiera de estos casos en un estado inviable. También se observa como el ozono causa daños al interior del huevo provocando granulaciones e impidiendo el desarrollo de la larva.

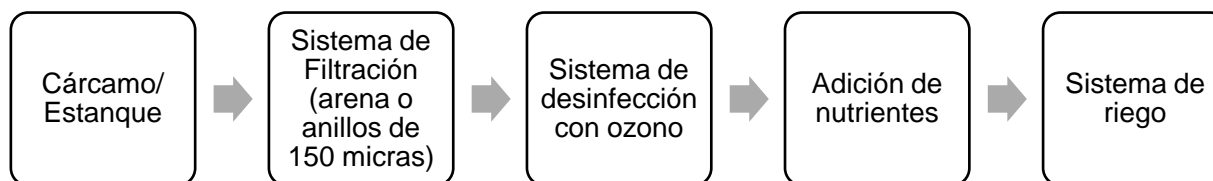


Las condiciones de ozonación que permiten obtener la desinfección de bacterias indicadoras de contaminación fecal, hongo y huevos de nematodo *Meloidogyne enterolobii* se presentan en la Tabla 17.

**TABLA 17 RESULTADOS FINALES**

SITIO DE ESTUDIO	ÉPOCA DE ESTIAJE		ÉPOCA DE LLUVIAS	
	Tiempo de contacto (min)	DOT (mgO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Tiempo de contacto (min)	DOT (mgO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )
<b>AG1</b>	10	NA	10	71.3
<b>AG2</b>		26.8		95.2
<b>AG3</b>		11.9		97.2
<b>AG4</b>		15.6		92.6

Finalmente con base en los resultados obtenidos en la Figura 15 se propone el tratamiento para el agua empleada en la irrigación, con el fin de garantizar tanto su calidad fisicoquímica como microbiológica.



**FIGURA 15 SISTEMA DE TRATAMIENTO PROPUESTO PARA EL AGUA DE IRRIGACIÓN**

## 6. CONCLUSIONES

- La calidad microbiológica de las diferentes muestras se encuentra fuera de los límites establecidos por la legislación mexicana para bacterias indicadoras de contaminación en todos los muestreos realizados, y a pesar de estar dentro del límite establecido para huevos de nematodo el problema por este parásito fitopatógeno persiste debido a las condiciones de operación de los sistemas de riego.
- No existe diferencia entre la calidad del efluente filtrado al emplear filtros de anillos de 150  $\mu\text{m}$ , filtros de arena, la combinación de ambos o filtros de 100  $\mu\text{m}$ . Cualquiera de estos sistemas garantiza la calidad fisicoquímica del efluente.
- Además de la inactivación de los huevos inoculados de nematodo *Meloidogyne enterolobii*, se logra la inactivación de bacterias indicadoras de contaminación fecal y de hongos presentes en las muestras.
- El tratamiento requerido para garantizar la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua empleada en la irrigación consiste en un sistema de filtración con anillos de 150  $\mu\text{m}$  y una etapa de desinfección con ozono.

## RECOMENDACIONES

- Incorporar el sistema de desinfección con ozono, previo a la incorporación de nutrientes al agua con el fin de evitar que estos reaccionen con el ozono y garantizar un buen funcionamiento del sistema de desinfección.
- Llevar a cabo el monitoreo de la calidad fisicoquímica y microbiológica de los diferentes puntos de estudio con el fin de tener más información acerca de la calidad del agua durante el año.
- Realizar pruebas a nivel piloto con el fin de obtener datos más certeros para la operación del sistema de desinfección en campo. Debido a que los resultados presentados en este trabajo se obtuvieron a partir de muestreos puntuales, los cuales no son representativos de la calidad del agua durante el año.
- Llevar a cabo un análisis de costos de operación de este tipo de sistema de desinfección, así como un análisis de consumo energético con base en las diferentes tecnologías para producir ozono disponibles en el mercado.

## ANEXO 1: MÉTODO YODOMÉTRICO

El objetivo de este método es la determinación de ozono en aire, oxígeno u otro gas de proceso.

Este método se puede emplear para concentraciones de  $1 \text{ gO}_3\text{m}^{-3}$  a  $200 \text{ gO}_3\text{m}^{-3}$ , el volumen esta expresado a condiciones normales de temperatura y presión (temperatura de  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  y presión de una atmósfera).

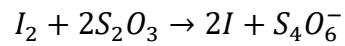
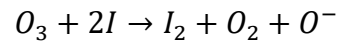
### REACTIVOS (TODOS DE GRADO ANALÍTICO)

- Yoduro de potasio granular (KI).
- Solución valorada de tiosulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) con concentración 0.1 N.
- Agua destilada.
- Ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) con concentración 0.1 N.

### DETERMINACIÓN DE OZONO

- Procedimiento
  1. Elaborar una solución al 2% ( $\text{m m}^{-1}$ ) de KI.
  2. Colocar 200 mL de la solución de KI en un lavador de gases, equipado con un dispositivo de burbujeo (tubo o difusor) el cual debe estar sumergido 15 cm como mínimo en la solución.
  3. Se burbujea el gas que contiene ozono al flujo deseado, haciendo pasar como mínimo 2 L.
  4. El yodo formado en la solución de KI contenida en el lavador de gases, inmediatamente después de ser acidificada con 10 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , se titula con la solución valorada de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ .
  5. La solución se titula hasta que el color desaparezca.

- Resultados



A partir de las reacciones que se llevan a cabo, la concentración de ozono en la fase gaseosa se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$C_g = \frac{T \times N \times 24}{V_{gas}}$$

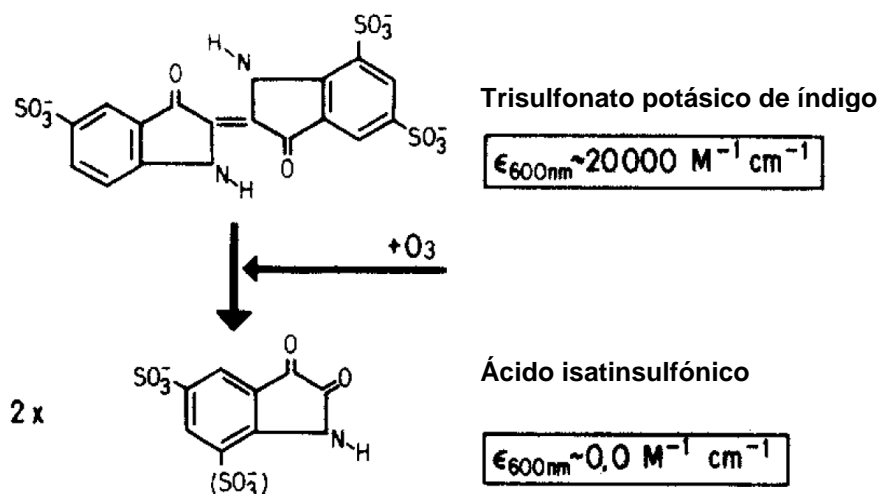
- $C_g$  Ozono en fase gas a la entrada o salida del reactor (mg/L)
- T mL de tiosulfato de sodio consumidos
- N Normalidad del tiosulfato de sodio
- 24 Factor de corrección (1 mL de tiosulfato de sodio equivale a 24 mg de ozono)
- $V_{gas}$  Volumen de gas que se deja pasar

## ANEXO 2: MÉTODO COLORIMÉTRICO ÍNDIGO

El objetivo de este método es la determinación de ozono en la fase acuosa dentro de un rango de  $0.005\text{-}30\text{ mgO}_3\text{L}^{-1}$ .

Este método relaciona la disminución de la absorbancia con el incremento de la concentración de ozono. Debido a que una molécula de ozono actúa con una molécula de índigo sobre el único enlace  $\text{C}=\text{C}$ , decolorando el reactivo pasando de azul a incolora (Figura 16).

**FIGURA 16 REACCIÓN DE TRISULFONATO POTÁSICO DE ÍNDIGO CON OZONO**



FUENTE: BADER AND HOIGNÉ, 1981.

### REACTIVOS (TODOS DE GRADO ANALÍTICO)

- Agua destilada.
- Trisulfonato potásico de índigo ( $\text{K}_3\text{C}_{16}\text{H}_7\text{N}_2\text{O}_{11}\text{S}_3$ ).
- Fosfato monobásico de sodio ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ).
- Ácido fosfórico concentrado ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ).

## PROCEDIMIENTO

- SOLUCIÓN MADRE

1. Añadir en un matraz aforado de 1 L, 500 mL de agua destilada y 1 mL de ácido fosfórico concentrado.
2. Añadir al matraz aforado, con agitación, 770 mg de trisulfonato potásico de índigo.
3. Aforar y conservar en un frasco ámbar.

Esta solución tiene presenta una absorbancia de  $20000 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$  a 600 nm, y es estable hasta por 4 meses.

- REACTIVO I

1. Añadir 20mL de la solución madre en un matraz aforado de 1 L.
2. Agregar 10g de fosfato monobásico de sodio y 7 mL de ácido fosfórico concentrado en el matraz aforado de 1 L.
3. Aforar con agua destilada y conservar en un frasco ámbar.

Esta solución se emplea para medir concentraciones menores a  $0.5 \text{ mgO}_3\text{L}^{-1}$ .

- REACTIVO II

1. Añadir 100 mL de la solución madre en un matraz aforado de 1 L.
2. Agregar 10 g de fosfato monobásico de sodio y 7 mL de ácido fosfórico concentrado en el matraz aforado de 1 L.
3. Aforar con agua destilada y conservar en un frasco ámbar.

Esta solución se emplea para concentraciones superiores a  $0.5 \text{ mgO}_3\text{L}^{-1}$ .

- DETERMINACIÓN DE OZONO EN LA FASE ACUOSA

1. Añadir 10 mL del Reactivo I o II, dependiendo el caso, en dos matraces aforados de 100 mL.

2. Añadir el volumen de muestra a analizar solo en uno de los matraces.
3. Aforar ambos matraces con agua destilada.
4. Medir la absorbancia a una longitud de onda de 600 nm. Se empleó un espectrofotómetro HACH DR3900 y celdas de cuarzo de 2.54 cm de ancho.
5. La concentración de ozono en la fase líquida se determina con la siguiente ecuación.

$$C_T = \frac{(A_b - A_m) \times 100}{0.42 \times V_m \times C}$$

Donde:

- $C_T$  Concentración de ozono residual en fase acuosa ( $\text{mgO}_3\text{L}^{-1}$ )
- $A_b$  Absorbancia del blanco (solución aforada únicamente con agua destilada)
- $A_m$  Absorbancia de la muestra (solución a la que se añadió la muestra)
- 0.42 Factor de sensibilidad de  $20000 \text{ cm}^{-1}$  para el cambio de absorbancia (600 nm) por mol de ozono añadido por litro.
- $V_m$  Volumen de muestra (mL)
- $C$  Recorrido de la luz en la celda (2.54 cm, ancho de las celdas empleadas)



## 7. BIBLIOGRAFÍA

Adin, A., & Alon, G. (1986). Mechanisms and process parameters of filter screens. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112(4), 293-304.

Agrios, G. N., Trejos, F., Eugenia, M., Menjivar Barahona, R. D., Descamps, P., Castro, R., & Ochoa, M. E. (2004). *Plant pathology* (No. 632 A278 2005). Universidad Nacional, Heredia (Costa Rica).

Amy, G., Carlson, K., Collins, M. R., Drewes, J., Gruenheid, S., & Jekel, M. (2006). Integrated comparison of biofiltration in engineered versus natural systems. *Recent Progress in Slow Sand and Alternative Biofiltration Processes*, 3-11.

Apha, A. WPCF (American Public Health Association, American Waterworks Association, Water Pollution Control Federation) (1992) Standard methods for the examination of water and wastewater. *Standard methods for the Examination of Water and Wastewater*, 17.

Ashbolt, N. J., Grabow, W. O., & Snozzi, M. (2001). Indicators of microbial water quality. *IWA Publishing*, 289-316.

Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture* (Vol. 29). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Bader H, Hoigné J (1981) Determination of ozone in water by the indigo method. *Water Research* 15, 89-112.

Baojun Y. and Eisenback J.D. (1983) *Meloidogyne enterolobii* n. sp. (Meloidogynidae), a root-knot Nematode parasitizing Pacara Earpod tree in China. *Journal of Nematology* 15(3):381-391.

Battino, R., Rettich, T. R., & Tominaga, T. (1983). The solubility of oxygen and ozone in liquids. *Journal of physical and chemical reference data*, 12(2), 163-178.

Bauder, T. A., Waskom, R. M., Davis, J. G., & Sutherland, P. L. (2011). *Irrigation water quality criteria*. Fort Collins, CO: Colorado State University Extension.

- Bebber, D. P., Holmes, T., Smith, D., & Gurr, S. J. (2014). Economic and physical determinants of the global distributions of crop pests and pathogens. *New Phytologist*, 202(3), 901-910.
- Beltrán, J. M. (1999). Irrigation with saline water: benefits and environmental impact. *Agricultural water management*, 40(2), 183-194.
- Benham B., Ross B. (2009). Filtration, Treatment, and Maintenance Considerations for Micro-Irrigation Systems. Virginia Cooperative Extension: Publication and Educational Resources, Publication 442-757.
- Bos, R., Carr, R., & Keraita, B. (2010). Assessing and mitigating wastewater-related health risks in low-income countries: An introduction. *Wastewater irrigation and health: Assessing and mitigating risk in low-income countries*, 29-47.
- Brachhold, H., R. Müller, and P. Günter, Plasma Reactions, in Ullmann's Encyclopedia of industrial Chemistry. 2005, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. p. 1-12.
- Brown, T., LeMay, E., Bursten, B., and Burdge, J. (2004). "Química La ciencia central" novena edición Pearson Education.
- Bryant, E.A., Fulton, G.P., Budd, G.L., 1992. Disinfection alternatives for safe drinking water. Van Nostrand Reinhold, New York
- Bucks, D. A., Nakayama, F. S., & Gilbert, R. G. (1979). Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. *Agricultural Water Management*, 2(2), 149-162.
- Calvo-Bado, L. A., Pettitt, T. R., Parsons, N., Petch, G. M., Morgan, J. A. W., & Whipps, J. M. (2003). Spatial and temporal analysis of the microbial community in slow sand filters used for treating horticultural irrigation water. *Applied and environmental microbiology*, 69(4), 2116-2125.
- Camacho, A., M. Giles, A. Ortigón, M. Palao, B. Serrano y O. Velázquez. 2009. Técnicas para el Análisis Microbiológico de Alimentos. 2ª ed. Facultad de Química, UNAM. México.

Campos, L. C., Su, M. F. J., Graham, N. J. D., & Smith, S. R. (2002). Biomass development in slow sand filters. *Water research*, 36(18), 4543-4551.

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

Capra, A., & Scicolone, B. (2004). Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip irrigation. *Agricultural water management*, 68(2), 135-149.

Carlins, J., J. and R. Clark, G., Ozone generation by corona discharge, in *Handbook of ozone technology and applications*, R. Rice, G. and A. Netzer, Editors. 1982, Butterworth-Heinemann: Boston. p. 41-75.

Cheremisinoff, N. P. (1998). *Liquid filtration*. Boston: Butterworth-Heinemann, (1998).

Comisión Nacional del Agua. (2000). *Desinfección para sistemas de agua potable y saneamiento. Desinfección. Manual de diseño de agua potable alcantarillado y saneamiento*.

Comisión Nacional del Agua. (2007). "Desinfección para sistemas de agua potable y saneamiento. Desinfección. Manual de agua potable alcantarillado y saneamiento.

Comisión Nacional del Agua. (2009). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Alcantarillado sanitario*. México, Distrito Federal.

CONAGUA (2011). *Indicadores de calidad del agua. Escala de Clasificación de calidad del agua. Demanda química de oxígeno*.

Dean, R., Van Kan, J. A., Pretorius, Z. A., Hammond-Kosack, K. E., Di Pietro, A., Spanu, P. D., & Foster, G. D. (2012). The Top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. *Molecular plant pathology*, 13(4), 414-430.

Decraemer, W., Hunt, D. J., Perry, R. N., & Moens, M. (2006). Structure and classification. *Plant nematology*, 3-32.

Dickin, S. K., Schuster-Wallace, C. J., Qadir, M., & Pizzacalla, K. (2016). A Review of Health Risks and Pathways for Exposure to Wastewater Use in Agriculture. *Environ Health Perspect*.

Düppenbecker, B., Maya, C., Kneidl, S., Meza, C., Lucario, E., Echagüe, V., & Cornel, P. (2013, October). Removal of helminth eggs by surface filtration. In 9th International Conference on Water Reuse (Vol. 27, p. 31)

Duran-Ros, M., Puig-Bargués, J., Arbat, G., Barragán, J., & de Cartagena, F. R. (2009). Performance and backwashing efficiency of disc and screen filters in microirrigation systems. *Biosystems engineering*, 103(1), 35-42.

Egorova, G. V., Voblikova, V. A., Sabitova, L. V., Tkachenko, I. S., Tkachenko, S. N., & Lunin, V. V. (2015). Ozone solubility in water. *Moscow University Chemistry Bulletin*, 70(5), 207-210.

Environmental Protection Agency (EPA). (2011). *Water Treatment Manual: Disinfection*.

FAO/WHO [Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization]. *Microbiological hazards in fresh leafy vegetables and herbs: meeting report*. Microbiological Risk Assessment Series No. 14, Rome, 2008.

Gadomska, K., Maleszewska, J., Krogulska, B., & Wichrowska, B. (1991). Analysis of survival rate of *Ascaris suum* (Goeze, 1782) eggs and of *Escherichia coli* in ozone-disinfected water. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Biological Sciences*, 3(39).

Gaspard, P., Ambolet, Y., Schwartzbrod, J., BINET, M. L., & EUZEBY, M. (1997). Valorisation des boues de stations d'épuration en vue de l'amélioration des sols destinés à l'agriculture: contamination parasitaire et modélisation en vue de la gestion du risque sanitaire. Discussion: Pollution des sols et santé de l'homme. *Bulletin de l'Académie nationale de médecine*, 181(1), 43-57.

- Geering, F. (1995). Optimization of ozone plants for water works in Switzerland.
- Godoy-Angulo, T. P., Yáñez-Juárez, M. G., Gastélum-Luque, R., López-Meza, M., & Almodovar-Pérez, (2012) T. J. Capítulo VI. Nematodos fitoparásitos y su importancia en la agricultura.
- Gómez, M., & Montes, M. Manejo de Nematodos Endoparásitos: Proyecciones Futuras.
- Gupta, U. C., & Gupta, S. C. (1998). Trace element toxicity relationships to crop production, livestock, and human health: implications for management. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 29(11-14), 1491-1522.
- HACH COMPANY. (2000). Manual de análisis de agua. Segunda edición en español.
- Hammeken Arana, A. M., Romero García, E. 2005. Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el municipio de San Andrés Cholula. Tesis Licenciatura. Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla.
- Hoigne, J., & Bader, H. (1976). The role of hydroxyl radical reactions in ozonation processes in aqueous solutions. *Water Research*, 10(5), 377-386.
- Hong, C. X., & Moorman, G. W. (2005). Plant pathogens in irrigation water: challenges and opportunities. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24(3), 189-208.
- Hugo H.J., Malan A.P. (2006). Literature Study on Control of Nematodes in Irrigation Water.
- Jeong, H., Kim, H., & Jang, T. (2016). Irrigation Water Quality Standards for Indirect Wastewater Reuse in Agriculture: A Contribution toward Sustainable Wastewater Reuse in South Korea. *Water*, 8(4), 169.
- Jimenez-Cisneros, B. E. (2007). Helminth ova control in wastewater and sludge for Agricultural reuse. *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, 3-9.

Jingjing Yu, Yi Li, Zhigang Liu, Wenlong Zhang & Dawei Wang (2015) Impact of loading rate and filter height on the retention factor in the model of total coliform (TC) removal in direct rapid sand filtration. *Desalination and Water Treatment*, 54:1, 140-146.

Kubiak, K., Błaszczak, M., Sierota, Z., Tkaczyk, M., & Oszako, T. (2015). Slow sand filtration for elimination of phytopathogens in water used in forest nurseries. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 30(8), 664-677.

Lamm, F. R. (2002, December). Advantages and disadvantages of subsurface drip irrigation. In *International Meeting on Advances in Drip/Micro Irrigation, Puerto de La Cruz, Tenerife, Canary Islands* (p. 13).

Li, Y., Yu, J., Liu, Z., & Ma, T. (2012). Estimation and modeling of direct rapid sand filtration for total fecal coliform removal from secondary clarifier effluents. *Water Science and Technology*, 65(9), 1615-1623.

López Vega, L. A., & Orta Ledesma, M. T. (2016). *Obtención de las constantes cinéticas y diseño de una cámara de contacto con ozono para la desinfección de helicobacter pylori en solución acuosa*, Tesis, Fac. Química, UNAM.

Manley, T.C. y Niegowsky, S.J. (1967) "Kirk Othmer Encyclopedia of Chemical Technology", Vol. 14, John Wiley and Sons, Inc., New York (2nd ed.), pp.410-432.

Martínez, L. (2001). Manual de operación y mantención de equipos de riego presurizado. IIA. Gob. Reg. Atacama. CNR. Centro Regional de Investigación Intihuasi. Centro Exp. Huasco. Boletín INIA, (65).

McDonald, D. R., Lau, L. S., Wu, I. P., Gee, H. K., & Young, S. C. H. (1984). Improved emitter and network system design for reuse of wastewater in drip irrigation (No. 163). Technical report.

Nicol, J. M., Turner, S. J., Coyne, D. L., Den Nijs, L., Hockland, S., & Maafi, Z. T. (2011). Current nematode threats to world agriculture. In *Genomics and molecular genetics of plant-nematode interactions* (pp. 21-43). Springer Netherlands.

NMX-AA-113-SCFI-2012. Norma Mexicana. Análisis de agua- Medición de huevos de Helminto en aguas residuales y residuales tratadas por observación microscópica-Método de prueba. Diario Oficial de la Federación, 2012.

Noble E.R. & Noble G.A. (1982). Parasitology. The Biology of Animal Parasites. Fifth Edition. Lea & Febiger, Philadelphia, USA, 522 pp.

NOM-001-SEMARNAT-1996. Norma Oficial Mexicana. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México. Diario Oficial de la Federación, enero 6 de 1998: 67-81.

NOM-003-SEMARNAT-1997. Norma Oficial Mexicana. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. México. Diario Oficial de la Federación, septiembre 21 de 1998.

Nyberg, E. T., White, S. A., Jeffers, S. N., & Bridges, W. C. (2014). Removal of Plant Pathogen Propagules from Irrigation Runoff using Slow Filtration Systems: Quantifying Physical and Biological Components. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225(6), 1-11.

O'connor, J. T., & O'connor, T. L. (2001). Removal of Microorganisms by Rapid Sand Filtration. Columbia MO: H2O'C Engineering. URL [Accessed: 15.02. 2012].

Ongley, E. D. (1997). *Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Estudio FAO: Riego y drenaje 55*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).

Ornat, C., Verdejo-Lucas, S., & Sorribas, F. J. (1997). Research Notes: Effect of the Previous Crop on Population Densities of *Meloidogyne javanica* and Yield of Cucumber. *Nematropica*, 27(1), 85-90.

Orta de Velasquez, M. T., & Monje-Ramirez, I. (2006). Combined pre-treatment of coagulation-ozonation for saline-stabilized landfill leachates. *Ozone: Science and Engineering*, 28(5), 309-316.

Orta de Velasquez, M. T., Martínez, J. L., Monje–Ramírez, I., & Rojas-Valencia, M. N. (2004). Destruction of helminth (*Ascaris suum*) eggs by ozone. *Ozone: science & engineering*, 26(4), 359-366.

Orta de Velásquez, M. T., Monje-Ramirez, I., & Muñoz Paredes, J. F. (2013). Effect of ozone in UF-membrane flux and dissolved organic matter of secondary effluent. *Ozone: Science & Engineering*, 35(3), 208-216.

Pereira, L. S., de Juan, J. A., Picornell, M. R., & Tarjuelo, J. M. (2010). El riego y sus tecnologías. *Albacete: CREA-UCLM*. 296p.

Perlmutter, B. A. (2015). Solid-liquid filtration: practical guides in chemical engineering. Oxford, [United Kingdom]: Butterworth-Heinemann, [2015].

Phocaidés, A. (2000). Technical handbook on pressurized irrigation techniques. *FAO, Rome*, 145-149.

Quinzaños, S. Dahl, C. Strube R., Mujeriegi, R. (2008). Helminth Eggs removal by microscreening for water reclamation and reuse. *Water Science and Technology*. Vol. 57, (5), pp 715-720.

Ragusa, S. R., Zoysa, D. D., & Rengasamy, P. (1994). The effect of microorganisms, salinity and turbidity on hydraulic conductivity of irrigation channel soil. *Irrigation Science*, 15(4), 159-166.

Rammah A. and Hirschmann H. (1988) *Meloidogyne mayaguensis* n. sp (Meloidoginidae), a root knot Nematode from Puerto Rico. *Journal of Nematology* 20(1):58-69

Rojas-Valencia, M. N. (2011). Research on ozone application as disinfectant and action mechanisms on wastewater microorganisms. *Virus*, 3, 4-0.

Roth, J. A., & Sullivan, D. E. (1981). Solubility of ozone in water. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 20(2), 137-140.

Sanz, J., Strube, R., Quinzaños, S., Dahl, C. P., Montoliu, I., Gracenea, M., & Mujeriegi, R. (2009). Helminth eggs removal in water reclamation: disc filtration as



an effective barrier. In Proceedings of the International Desalination Association World Congress, International Desalination Association, Dubai, United Arab Emirates, November (pp. 7-12).

Schijven, J. F., van den Berg, H. H., Colin, M., Dullemont, Y., Hijnen, W. A., Magic-Knezev, A., & Wubbels, G. (2013). A mathematical model for removal of human pathogenic viruses and bacteria by slow sand filtration under variable operational conditions. *Water research*, 47(7), 2592-2602.

Seeger, E. M., Braeckevelt, M., Reiche, N., Müller, J. A., & Kästner, M. (2016). Removal of pathogen indicators from secondary effluent using slow sand filtration: Optimization approaches. *Ecological Engineering*, 95, 635-644.

Shuval, H. I., Yekutieli, P., & Fattal, B. (1985). Epidemiological evidence for helminth and cholera transmission by vegetables irrigated with wastewater: Jerusalem—a case study. *Water science and technology*, 17(4-5), 433-442.

Sutherland, K. (2008). *Filters and filtration handbook*. Oxford: Elsevier, [2008].

Tajrishy, M. A., Hills, D. J., & Tchobanoglous, G. (1994). Pretreatment of secondary effluent for drip irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(4), 716-731.

Tien, C. (2012). *Principles of filtration*. Amsterdam: Elsevier, 2012.

Tripathi, V. K., Rajput, T. B. S., & Patel, N. (2014). Performance of different filter combinations with surface and subsurface drip irrigation systems for utilizing municipal wastewater. *Irrigation Science*, 32(5), 379-391.

U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA). (1986) "Desing Manual: Municipal Wastewater Disinfection. EPA-625/1-86/021.

USEPA, *Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance manual*, 1999.

Vázquez, R. P. (1996) *¿Problemas con el Tratamiento de Aguas?: Prueba con el ozono*, Tesis, Fac. Química, UNAM.

Verdejo-Lucas, S., Sorribas, F.J., Pons, J., Forner, J.B., Alcaide, A. 1997. The mediterranean biotype of *Tylenchulus semipenetrans* in Spanish citrus orchards. *Fund. Appl. Nematol.*, 20: 399-404.

Vinten, A. J. A., Mingelgrin, U., & Yaron, B. (1983). The effect of suspended solids in wastewater on soil hydraulic conductivity: II. Vertical distribution of suspended solids. *Soil Science Society of America Journal*, 47(3), 408-412.

Westcot, D. W. (1997). Quality control of wastewater for irrigated crop production (Water reports-10). *Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy*.

Wojtowicz, J., A., Ozone, in Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. 2005, John Wiley & Sons. p. 768-822.

Zanetti, F., De Luca, G., & Sacchetti, R. (2006). Microbe removal in secondary effluent by filtration. *Annals of microbiology*, 56(4), 313-317.

Zuluaga, V. V., Torrez, L. D. S., & Aponte, A. (2009). Evaluación de la filtración lenta en arena como tratamiento terciario de agua residual doméstica con fines de reuso agropecuario y piscícola. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, (8), 39-49.