

0 1177/10  
21.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**TESIS**

**" DESINFECCIÓN DE AGUA RESIDUAL POR LUZ  
ULTRAVIOLETA PROVENIENTE DE TRATAMIENTO  
FÍSICO-QUÍMICO O BIOLÓGICO PARA REÚSO AGRÍCOLA "**

**PRESENTADA POR:**

**JACINTO MORALES ROQUE**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**DIRIGIDA POR:**

**DRA. MA. TERESA ORTA LEDESMA**

Ciudad Universitaria, septiembre de 1997

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## **AGRADECIMIENTOS**

---

***DRA. MA. TERESA ORTA LEDESMA***

Por la confianza, apoyo y dedicación que me brindó para realizar este trabajo.

***M. en B. IGNACIO MONGE RAMÍREZ***

Por la dedicación, empeño y entusiasmo para obtener mejores resultados.

A los sinodales del jurado por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo:

***DR. PEDRO MARTÍNEZ PEREDA***

***DRA. ROSARIO ITURBE ARGÜELLES***

***M. en I. ANN WELLENS PURNAL***

***M. en I. FRANCIS SOLER ANGUIANO***

## DEDICATORIAS

---

### **A DIOS:**

Por darme la oportunidad de seguir viendo la luz del día.

### **A MIS PADRES:**

Por seguir confiando en mí.

A estos grandes amigos que me apoyaron en cada momento de mi vida y que siguen compartiendo sentimientos especiales de alegría, amistad y lealtad:

*Arturo, Ricardo, y Evelia*

A mis compañeros del Instituto de Ingeniería, por los deseos de superación que me enseñaron:

*Dante, Gloria, Miguel Angel, Arminda, Isaac, Juan Manuel.*

A *Lupita y Marce* por el entusiasmo y la confianza que me depositaron.

---

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general:**

- **Determinar la factibilidad técnica de aplicar luz ultravioleta como medio de desinfección a agua residual proveniente de tratamiento físico-químico cuyo destino final es el reúso agrícola.**

### **Alcances:**

- **Determinar las características hidráulicas del sistema ultravioleta.**
- **Adaptar un modelo matemático que proporcione información aplicable al reactor UV.**
- **Establecer las limitantes de la tecnología, utilizando como medio de comparación un efluente proveniente de tratamiento biológico.**

## ÍNDICE

---

	Página
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	i
<b>LISTA DE TABLAS</b>	ii
<b>INTRODUCCIÓN</b>	iv
<b>ANTECEDENTES</b>	1
<b>CAPÍTULO 1 RADIACIÓN ULTRAVIOLETA</b>	
<b>1 <i>Características de la radiación ultravioleta</i></b>	<b>6</b>
1.1 La luz ultravioleta y la fotoquímica	9
1.2 Desinfección por radiación ultravioleta	9
1.2.1 Mecanismos de desinfección	10
1.3 Ventajas y desventajas de la radiación UV	11
1.4 Efecto de la luz UV sobre diferentes organismos	14
1.5 Relación de dosis para UV	14
1.6 Tiempo de exposición	17
1.7 Efecto de las características del agua residual sobre la desinfección UV	17
1.7.1 Efecto del porcentaje de transmitancia sobre el agua residual	17
1.7.2 Efecto de los sólidos suspendidos (SS)	18
1.8 Reactivación de microorganismos	18
<b>CAPÍTULO 2 SISTEMAS DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA</b>	
<b>2 <i>Desinfección del agua residual por luz ultravioleta</i></b>	<b>20</b>
2.1 Descripción general de sistemas ultravioleta	20
2.1.1 Lámparas ultravioleta germicidas	20
2.1.2 Efecto germicida de la longitud de onda	25
2.2 Aspectos hidráulicos de unidades de desinfección ultravioleta	27
2.2.1 Diseños típicos de reactores UV	27
2.2.1.1 Configuración de los reactores UV	27
2.3 Consideraciones para el diseño matemático de un reactor UV	33
2.3.1 Inactivación de bacterias	33
2.3.2 Constante de inactivación $k_d$	35
2.4 Consideraciones para el diseño hidráulico de un reactor UV	36
2.4.1 Teoría de la hidráulica de diferentes unidades UV	36

	<b>Página</b>
<b>2.4.2</b> Características de flujo	37
<b>2.4.2.1</b> Distribución del tiempo de residencia (RTD)	37
<b>2.4.2.2</b> Tiempo de residencia promedio ( $t_m$ )	38
<b>2.4.2.3</b> Varianza de la curva RTD	38
<b>2.4.2.4</b> Características dispersivas	41
<b>2.4.2.5</b> Modelos para flujos no ideales	42
<b>2.4.3</b> Turbulencia	45
<b>2.4.4</b> Volumen efectivo	47
<b>2.4.5</b> Intensidad ultravioleta	48
<b>2.4.6</b> Variables de procesos que afectan la eficiencia de desinfección	48
<b>2.4.6.1</b> Absorción UV	48
<b>2.4.6.2</b> Calidad del agua residual	49
<b>2.4.6.3</b> Flujo	49
<b>2.4.6.4</b> Densidad inicial	50
<b>2.4.6.5</b> Sólidos suspendidos (SS)	50
<b>2.4.6.6</b> Absorbancia UV	50
<b>2.4.7</b> Consideraciones de mantenimiento en un reactor UV	51
<b>2.4.7.1</b> Mantenimiento del reactor	51
<b>2.4.7.2</b> Sistemas de revisión	52
<b>2.4.7.3</b> Limpieza en el lugar de rutina	52
<b>2.4.8</b> Consideraciones de seguridad	53

## **CAPÍTULO 3 COSTOS DE PROCESOS DE DESINFECCIÓN**

<b>3</b> <i>Costos de procesos de desinfección</i>	<b>54</b>
<b>3.1</b> Criterios para estimación de costos	54
<b>3.2</b> Índice de costos	55
<b>3.3</b> Ajuste de costos	55
<b>3.4</b> Costos para sistemas de desinfección UV	55
<b>3.4.1</b> Costos de capital para sistemas de desinfección UV	55
<b>3.4.2</b> Costos de O & M para sistemas de desinfección UV	56
<b>3.5</b> Costos para sistemas de desinfección de cloración/decloración	57
<b>3.5.1</b> Costos de capital para sistemas de cloración/decloración	57
<b>3.5.2</b> Costos de O & M para sistemas de cloración/decloración	59
<b>3.6</b> Comparación de costos de UV y cloración/decloración	59
<b>3.7</b> Resumen de la comparación de costos	60

**CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

<b>4 Experimentación</b>	<b>62</b>
<b>4.1 Materiales</b>	<b>62</b>
<b>4.1.1 Descripción de la unidad de desinfección ultravioleta</b>	<b>62</b>
<b>4.2 Procedimiento de instalación y operación del sistema UV</b>	<b>63</b>
<b>4.2.1 Instalación del sistema UV</b>	<b>63</b>
<b>4.2.2 Procedimiento de operación del sistema UV</b>	<b>64</b>
<b>4.3 Desarrollo experimental</b>	<b>64</b>
<b>4.3.1 Caracterización hidráulica</b>	<b>64</b>
<b>4.3.1.1 Desarrollo de la curva de distribución</b>	<b>65</b>
<b>4.3.1.2 Cálculo del tiempo de residencia promedio del sistema UV</b>	<b>68</b>
<b>4.4 Parámetros a evaluar</b>	<b>68</b>
<b>4.5 Técnicas analíticas</b>	<b>68</b>
<b>4.5.1 pH</b>	<b>68</b>
<b>4.5.2 Conductividad</b>	<b>69</b>
<b>4.5.3 Sólidos suspendidos totales</b>	<b>69</b>
<b>4.5.4 Sólidos disueltos totales</b>	<b>69</b>
<b>4.5.5 Coliformes fecales</b>	<b>69</b>
<b>4.5.6 Temperatura</b>	<b>69</b>
<b>4.5.7 Turbiedad</b>	<b>70</b>
<b>4.6 Procedencia de la muestra</b>	<b>70</b>
<b>4.6.1 Planta piloto de Ojo de Agua</b>	<b>70</b>
<b>4.6.2 Planta de tratamiento de aguas residuales de ciudad universitaria, UNAM</b>	<b>70</b>

**CAPÍTULO 5 RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN**

<b>5 Resultados de la caracterización hidráulica</b>	<b>72</b>
<b>5.1 Desarrollo de la curva de distribución del tiempo de residencia</b>	<b>72</b>
<b>5.2 Caracterización microbiológica</b>	<b>74</b>
<b>5.2.1 Constante de inactivación <math>k_d</math></b>	<b>75</b>
<b>5.2.2 Reducción decimal para la caracterización microbiológica</b>	<b>76</b>
<b>5.3 Flujo no ideal: modelo de dispersión</b>	<b>76</b>



---

	<b>Página</b>
<b>5.3.1</b> Reducción decimal para la caracterización de tanques completamente mezclados en serie	77
<b>5.4</b> Resultados fisicoquímicos y microbiológicos	77
<b>5.5</b> Fotorreactivación	80
<b>5.6</b> Comentarios de los resultados	80
<b>5.6.1</b> Conductividad	80
<b>5.6.2</b> Temperatura	80
<b>5.6.3</b> pH	81
<b>5.6.4</b> Turbiedad	81
<b>5.6.5</b> Sólidos disueltos totales y sólidos suspendidos totales	81
<b>5.6.6</b> Coliformes fecales	81
<b>5.7</b> Análisis comparativo de los resultados	82

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **APÉNDICE**

## LISTA DE FIGURAS

---

		Página
Fig. 1	Espectro electromagnético con escala expandida de radiación ultravioleta.	8
Fig. 2	Ejemplo de ADN y daño UV al ADN.	16
Fig. 3	Mecanismo de reacción propuesto en dos etapas para fotorreactivación.	19
Fig. 4	Efectividad germicida relativa de energía radiante. Espectro de absorción de ADN.	22
Fig. 5	Curva de efectividad bactericida.	26
Fig. 6	Ejemplos de reactores ultravioleta, localizados en Estados Unidos.	30
Fig. 7	Diseños típicos de reactores ultravioleta.	31
Fig. 8	Curva típica de la distribución del tiempo de residencia.	40
Fig. 9	Ejemplos de curvas para varios flujos: a) Mezclado completo b) Pistón c) Arbitrario d) Respuesta hipotética.	40
Fig. 10	Diagrama esquemático del reactor UV.	66
Fig. 11	Diagrama esquemático del sistema de desinfección ultravioleta.	67
Fig. 12	Diagrama de flujo de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Ciudad Universitaria.	71

## LISTA DE TABLAS

---

	Página	
Tabla 1	Características de instalaciones que tratan agua residual empleando la desinfección UV en el Norte de América.	5
Tabla 1.1	a y b Comparación de características ideales y actuales de desinfectantes comúnmente usados	12
Tabla 1.2	Respuesta de organismos a diferentes tiempos de contacto con luz ultravioleta.	14
Tabla 1.3	Efectividad relativa de desinfección UV para algunos sistemas biológicos.	15
Tabla 1.4	Dosis representativas de UV para diferentes efluentes.	16
Tabla 1.5	Impacto de las características del agua residual sobre la desinfección UV.	17
Tabla 2.1	Intensidades de luz emitidas por lámparas de vapor de mercurio en función de la longitud de onda y el tipo de lámpara.	23
Tabla 2.2	Relación teórica lámpara/flujo.	24
Tabla 2.3	Características de las lámparas de mercurio de baja presión.	24
Tabla 2.4	Comparación de tubos de arco de media y baja presión.	32
Tabla 3.1	Costos de capital para sistemas de desinfección UV.	56
Tabla 3.2	Costos de O & M para sistemas de desinfección UV.	57
Tabla 3.3	Costos unitarios para sistemas de cloración/decloración para flujos promedios de 0.044, 0.438 y 4.381 m <sup>3</sup> /s.	58
Tabla 3.4	Costos de O & M para sistemas de desinfección de cloración/decloración.	59
Tabla 3.5	Comparación de costos anualizados totales para sistemas de desinfección por radiación ultravioleta y cloración/decloración.	60
Tabla 3.6	Comparación de costos estimados de O & M anuales para el año 2000. Northwest Bergen County.	61

---

	Página
<b>Tabla 4.2</b> Parámetros seleccionados para la desinfección UV.	68
<b>Tabla 5.1</b> Resultados del tiempo de exposición real a diferentes flujos.	72
<b>Tabla 5.2 a</b> Características hidráulicas de la unidad UV.	73
<b>Tabla 5.2 b</b> No. de dispersión, $D/uL$ y no. de tanques completamente mezclados, $m$ .	74
<b>Tabla 5.3</b> Constantes de inactivación y su valor relativo comparado con datos de literatura.	76
<b>Tabla 5.4</b> a, b y c Resultados obtenidos de efluentes provenientes del tratamiento físico-químico de la planta de Ojo de Agua.	Apéndice
<b>Tabla 5.5</b> a y b Resultados obtenidos de efluentes provenientes de los filtros de la planta de C.U.	Apéndice
<b>Tabla 5.6</b> a y b Resultados obtenidos de efluentes provenientes del tratamiento físico-químico de la planta de Ojo de Agua.	Apéndice

## INTRODUCCIÓN

---

Las enfermedades producidas por el agua tales como el cólera, la fiebre tifoidea, la gastroenteritis, la disentería y la hepatitis infecciosa originan la muerte de aproximadamente 400 niños cada hora en el mundo (*Gadgil, 1995*). Ante este problema de salud pública, el Laboratorio *Lawrence Berkeley* de California propuso un sistema de desinfección utilizando luz ultravioleta (UV) aplicable a comunidades rurales de la India. El diseño consideró entre las variables importantes el contar con: un tiempo de vida largo, de uso práctico, barato y que pudiera ser construido en el lugar. Este proyecto dió inicio desde 1993 y los esfuerzos se incrementaron cuando brotó una epidemia de cólera en la India, Tailandia y Bangladesh. Un año más tarde, en la India continuó la epidemia y entre los meses de mayo y agosto murieron aproximadamente 2200 personas.

El esfuerzo en la investigación de la desinfección por luz UV recibió apoyo por parte de la Agencia de Estados Unidos de Desarrollo Internacional (USAID), del Departamento de Estados Unidos de Energía, de la Fundación Rockefeller, de la Fundación Joyce Mertz-Gillmore y de la Fundación de Bancos dirigida al Dr. Gadgil. Las compañías General Electric ( U.S.A.) y la Phillips (Países Bajos) donaron lámparas UV para el proyecto. Los investigadores establecieron el programa en la India así como para los lugares que lo requirieran. Así también contactaron al Instituto de Ingeniería con el fin de dar a conocer el prototipo.

En México, la bacteria del cólera apareció en 1982 (*Lovera, 1995*) en el Río Coatzacoalcos. Siete años después, los investigadores hallaron bacterias patógenas semejantes en las lagunas Del Carmen, Machona, Mecoacán y en el estado de Tabasco. Esto originó un problema sanitario, de donde se priorizó darle un mejor tratamiento de desinfección y potabilización a las aguas.

La desinfección de agua residual, es el proceso final de una planta de tratamiento y se vigila más cuidadosamente cuando los cuerpos receptores se utilizan como fuentes de agua potable, para propósitos recreativos o son dispuestos para reúso en el riego agrícola. El uso del cloro ha sido seriamente cuestionado, debido a que al entrar en contacto el cloro residual con materia orgánica forman subproductos que pueden ser tóxicos a la vida acuática y al hombre, por lo que es importante evaluar otros métodos alternativos. Una opción es la radiación con luz ultravioleta (UV), con una longitud de onda cercana a los 254 nm, la cual elimina bacterias mediante la alteración fotoquímica del ácido desoxirribonucleico en la célula.

## Resumen

El contenido de este documento se encuentra organizado de la siguiente manera: en el capítulo 1 se presentan los conceptos básicos que introducen al lector en el campo de la desinfección de agua residual mediante luz UV, considerando los mecanismos de desinfección, las ventajas y desventajas que ofrece esta alternativa así como los aspectos más relevantes de dicha tecnología. El capítulo 2 muestra diferentes sistemas de desinfección que difieren principalmente en la configuración y arreglo de las lámparas germicidas, el flujo de agua a tratar y las características de las mismas lámparas. Además nos presenta algunas consideraciones para un diseño matemático e hidráulico. En el capítulo 3 se describe una comparación teórica de costos de procesos de desinfección con radiación ultravioleta y cloración/decloración empleando criterios de estimación de costos de capital y de operación y mantenimiento (O & M). En el capítulo 4 se describe la metodología que se utilizó para llevar a cabo el desarrollo de esta tesis, detallando el sistema de desinfección UV en particular, así como el uso y mantenimiento del mismo. Considerando además, el sistema de trazado para el manejo de tiempos de exposición promedio reales así como los parámetros seleccionados de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes. En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos mediante tablas y gráficas, así como su análisis respectivo.

Con base en los resultados se tiene: De la caracterización hidráulica se determinó que el número de dispersión para los diferentes flujos está entre 0.046 y 0.134, dando como resultado una gran dispersión. Para este prototipo se consideraron: el flujo, el tiempo promedio real, la intensidad de la lámpara UV así como el número de organismos iniciales y sobrevivientes al tratamiento para obtener la constante de inactivación  $K_d = -0.005461 \text{ m}^2/\text{J}$ .

Se aplicó una ecuación (Nieuwstad, 1991) obteniendo una reducción decimal para la caracterización microbiológica en la cual se empleó a coliformes fecales como indicadores de contaminación. Obteniendo la siguiente ecuación lineal:  $y = 0.0055 x + 5E-15$ . La ecuación lineal se utiliza para correlacionar dosis de UV con remoción de coliformes fecales.

Considerando que el reactor UV presentó un alto grado de dispersión, éste se modeló como un número de tanques completamente mezclados en serie. Obteniendo la siguiente ecuación lineal:  $y = 0.0009 x + 1.3138$ . Aplicada para obtener la reducción decimal (y) de coliformes fecales en función de la dosis UV (x).

Los parámetros monitoreados con mayor interés fueron la temperatura, el pH, la turbiedad y los coliformes fecales. Se encontró que las muestras provenientes del tratamiento físico-químico contenían un índice más alto de coliformes fecales con respecto a las muestras de los filtros de C.U., por tal motivo se requirieron tiempos de exposición de 18 a 20 min para alcanzar la Norma. Para las muestras de los filtros de C.U. se logró alcanzar la Norma para coliformes fecales en un tiempo de 2.5 minutos.

Con respecto al fenómeno de fotorreactivación, es importante hacer notar que para las muestras provenientes del tratamiento físico-químico se presentó tal efecto mientras que para las muestras del tratamiento biológico el efecto fue nulo. Esto se debió principalmente a la calidad del agua.

## ANTECEDENTES

---

El objetivo de la desinfección en el tratamiento de agua residual es la inactivación de microorganismos patógenos. La vigilancia de su efectividad es importante ya sea en el reúso como recarga de fuentes de agua potable, para propósitos recreativos, en el riego agrícola o como una medida de control de la contaminación del medio ambiente. Por tal motivo, en América Latina, el empleo del cloro en las plantas de tratamiento ha sido manejado en forma generalizada. Esto se atribuye en parte a su bajo costo, a la efectividad germicida que presenta y a los efectos residuales que mantiene en el agua, aunque algunos estudios (Whitby, 1984) han revelado que estos últimos en fuentes de agua superficiales deterioran la vida acuática. Por otra parte se reconoce que: tanto el agua de origen superficial o subterráneo como el agua residual, contienen en diferentes proporciones algunas sustancias orgánicas naturales (*fenoles, ácidos fúlvicos y húmicos, etc*) que pueden actuar como precursores en la formación de trihalometanos (THM's) y otros subproductos de la desinfección, que son tóxicos para los humanos y los animales (Carminio, 1994). Debido a esta serie de efectos se han desarrollado otras alternativas tecnológicas de desinfección tales como *la ozonación y la luz ultravioleta*.

En nuestro país, la infraestructura para la recolección, distribución y tratamiento de agua residual se encuentra en desarrollo, sobre todo si se compara con respecto a los servicios de agua potable. Por otra parte, con frecuencia se presentan conflictos por el uso de la misma, en particular en zonas donde el recurso no es abundante. Ante esta situación, es común el reúso del agua residual tratada, principalmente para zonas recreativas y para riego agrícola, con todos los riesgos sanitarios que implica. Por lo tanto, la solución al problema de tratamiento de agua residual debe ser prioritario, no sólo para proteger el medio ambiente sino también por razones socioeconómicas, dado su alto costo en materia de salud y calidad de vida.

Como ya se mencionó, debido al impacto potencial al medio ambiente y por otro lado los efectos a la salud por el empleo del cloro y los subproductos que genera se han desarrollado desinfectantes alternativos. Algunos de ellos están todavía en la etapa experimental pero se reconocen en la práctica para la desinfección de agua residual.

En este trabajo se empleó luz UV como medio alternativo a la cloración comparando dos tipos de efluentes: uno proveniente de tratamiento físico-químico y otro de tratamiento biológico, así también se evaluó el efecto de fotorreactivación de microorganismos para el prototipo particular de este estudio.



## Técnicas alternativas de desinfección

### Desinfección con ozono

La capacidad del ozono para desinfectar agua se reconoció en 1886 por Meritens (*Langlais, 1991*). Poco tiempo después, la firma alemana *Siemens & Halske*, fabricantes de equipo eléctrico, probó la aplicación para la desinfección de agua potable. En paralelo se construyó una planta piloto en Martinikenfelde, Alemania. *Froelich* reportó en 1891 que las pruebas realizadas en ese sitio mostraron que el ozono era efectivo en las bacterias. En 1889, el alemán *Marius Paul Otto* empezó a estudiarlo en la Sorbona de la Universidad de París, en 1897 creó la primera compañía especializada para la fabricación e instalación de equipo de ozonación. Esta compañía llamada " *Compagnie Provençale Général* " fue renombrada en 1919 como " *La Compagnie Général de l'Ozone* " y en 1929 se denominó " *La Compagnie des Eaux et de l'Ozone* " para la aplicación del agua potable.

En 1893 en Oudshoorn, Países Bajos, se instalaron algunas plantas a nivel piloto empleando ozono en el tratamiento de agua potable. Más tarde se construyeron en París, Francia (1898), Wiesbaden, Alemania (1901), Paderbon, Alemania (1902), Niagara Falls, N.Y. (1903), Saint-Petersbourg (Leningrado), Nice, Francia (1906), Chartres, Francia (1908), París/St. Maur, Francia (1909) y Madrid, España (1910). El número de instalaciones creció rápidamente principalmente en 1914. *Vosmaer (1916)* registró cerca de 49 en Europa (*Langlais, 1991*). La mayoría de estas plantas se localizó en Francia. Otro de los usos que resultó atractivo fue en la eliminación de olor y sabor. Sin embargo, para otros propósitos de desinfección (por ejemplo en el tratamiento de agua subterránea de alta calidad) las aplicaciones surgieron antes de la Primera Guerra Mundial. En 1916 *Vosmaer*, reportó observaciones sobre la oxidación de hierro y manganeso después de la ozonación y en los años 60's creció esta aplicación en Francia y Alemania.

Durante los años 60's las investigaciones sobre el comportamiento del ozono no se hicieron esperar en Inglaterra y Francia construyéndose cámaras de contacto y llevando a cabo varios experimentos. Las aplicaciones más recientes de ozono en Estados Unidos son para controlar la formación de subproductos (*DBP*) en la desinfección así como minimizar el crecimiento microbiológico en tuberías de conducción de agua. En 1974, el americano *Rook* descubrió la formación de trihalometanos (*THM's*) como subproductos de la cloración y en 1980 se llevó a cabo la aplicación en particular por la *Comunidad Económica Europea*.

En el Norte de América diversas plantas de tratamiento de agua experimentaron con ozono antes de la Primera Guerra Mundial. Desde 1940, se vio muy poca actividad en cuanto a esta práctica en los Estados Unidos y no fue sino hasta cerca de los 70's, con la inclusión de los subproductos generados por el cloro en la normatividad, que creció aceleradamente el interés por el ozono. Cerca de 1990 se equipararon con ozono 40 plantas de tratamiento de agua, en el Norte de América (*Langlais, 1991*).

### **Desinfección por radiación ultravioleta (UV)**

La desinfección de agua potable usando luz ultravioleta (UV) ha sido usada a nivel piloto por muchos años en otros países. Recientemente se han construido sistemas de desinfección de agua residual con base en los requerimientos normativos de descarga. Mientras la desinfección de agua residual ha sido considerada cara e inapropiada, diferentes proyectos a nivel piloto y macro demuestran su efectividad (*Qualls, 1989*).

La desinfección por este método resulta ser económicamente competitiva con respecto a la cloración como medio de desinfección de efluentes de agua residual municipal. Debido a su características físicas, puede ser aplicada a un efluente de agua residual sin producir residuales químicamente tóxicos. Además, la literatura concluye que la luz UV es efectiva en la eliminación de virus patógenos y bacterias vegetales (*Severin, 1980*).

La primera aplicación de radiación ultravioleta (UV) para desinfectar agua data de 1877. En 1901 *Hewitt* aplicó la tecnología de las lámparas de vapor de mercurio y posteriormente las chaquetas de cuarzo, que se utilizaron para amortiguar los efectos de temperatura. En 1909 se experimentó en Marsella, Francia un sistema de radiación UV para comparar su efectividad con respecto a diferentes dispositivos de filtración y de purificación. En 1916, en Estados Unidos empezó a funcionar la primera planta municipal que empleó luz UV. En 1942 se encontró que la radiación ultravioleta era más eficaz para la remoción del virus de la poliomielitis en el agua que los procesos de coagulación-floculación, sedimentación, filtración o carbón activado. En los años 60's tanto en Alemania como en Gran Bretaña la desinfección se había aplicado a los abastecimientos de aguas públicas. En Gran Bretaña, los resultados de las investigaciones de *Stander* y *Fuller* sobre el efecto de la radiación ultravioleta, con lámpara de resonancia de mercurio (en la región de 2537 Å), sobre la bacteria *Schistosoma mansoni* pusieron de manifiesto que una exposición de 4 a 8 segundos inhibía completamente el desarrollo de este organismo. Hasta entonces el tratamiento con luz UV se aplicó ampliamente en la Unión Soviética, aunque se limitó a sistemas pequeños.

Antes de 1978, su uso en el tratamiento de agua considerándose inapropiado y de alto costo debido a las limitaciones del equipo del que entonces se disponía. Esta tecnología se ha empleado principalmente en Europa y Norteamérica. Los avances técnicos logrados actualmente hacen que la situación cambie debido a las desventajas que presenta la cloración con respecto a ésta. *Downes y Blount* determinaron que los efectos germicidas de la luz solar sobre una población de diversos microorganismos era debido a luz UV de onda corta.

Hasta los años 60's y 70's, la mayor parte del desarrollo de la tecnología UV para desinfección de agua residual logró alcanzar importancia. Posteriormente, mediante grandes esfuerzos se logró uniformidad en los procedimientos de diseño obteniendo gran experiencia en el campo de operación y mantenimiento. *Robert y Hoot* demostraron la efectividad de UV con aguas residuales de calidad diferente y determinaron el efecto en la calidad del agua (particularmente sólidos y absorbancia UV) sobre la eficiencia del proceso. Hasta 1981 se habían localizado aproximadamente 15 plantas fundadas bajo un programa de los Estados Unidos. En 1985 un estudio realizado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos estimó que existen aproximadamente 120 plantas de tratamiento de agua residual con sistemas UV en operación, en construcción y en diseño. El 50% de esas plantas fueron diseñadas para flujos mayores de 0.023 l/s (*Water Disinfection, 1986*).

La *tabla 1* muestra la efectividad de la radiación UV sobre agua residual, además la ubicación de plantas en el norte de América que la utilizan como medio de desinfección.

Tabla 1 Características de instalaciones que tratan agua residual empleando la desinfección UV en el Norte de América

	Ubicación							
	Wintergreen Va	London Ontario	Dewey OK	Northfield Mi	NW Berga NJ	Loesburg Va	Myersville MD	Athem AL
<b>Datos de diseño:</b>								
Flujo ( $m^3/s$ )	3000	5680	4160	6430	90850	18900	3200	51000
SS/DBO ( $mg/l$ )	10/10	20/20	30/30	30/30	30/30	20/20	20/20	30/12
Coliformes fecales (UFC/100ml)	200	200	200	200	200	200	200	200
Transmitancia (%)	70	65	65	65	65	65	65	65
Dosis ( $Ws/cm^2$ )	25000	35000	30000	30000	27800	32800	38000	30000
<b>Resultados:</b>								
SS promedio ( $mg/l$ )	4.8	13.5	23.1	16.7	7	3.4	12	4.4
Coliformes fecales (UFC/100ml) promedio	4.5	57	37	80	33	18	125	175
<b>Tratamiento</b>	Lodosactivados + Filtración	Lodos activados	Laguna de oxidación	Filtros Biológicos	Lodos activados	Filtro biológico + filtro arena	Filtro biológico + filtro arena	Lodos activados

Fuente: Gross, T.S.C., et al. "Disinfection of Sewage Effluents: The Jersey Experience". Journal of the Institution of Water and Environment Management, JIEM 92. Conference Paper. p.481-491.1993

## CAPÍTULO 1

### RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

---

Es importante que el lector se familiarice con los términos que se emplean por lo que en este capítulo se describe una serie de conceptos elementales de radiación ultravioleta (UV) así como el efecto y el mecanismo empleados para el proceso de desinfección.

#### 1 Características de la radiación ultravioleta

La luz ultravioleta emitida por el sol se disipa en la atmósfera antes de llegar a la superficie terrestre, ésta es una forma natural de generar *radiación ultravioleta*; artificialmente puede ser producida por medio de lámparas especiales (arcos de carbón polimetálicos, hidrógeno y de vapor de mercurio).

Las formas de energía radiante aparentemente diferentes tales como: las ondas de radio, solares, X, gamma y ultravioleta tienen propiedades similares y son llamadas *radiaciones electromagnéticas*. La característica principal que las identifica se denomina longitud de onda ( $\lambda$ ), y se define como la distancia medida a lo largo de la línea de propagación, entre las crestas de las ondas adyacentes. Esta característica se expresa en micrones ( $\mu$ ), milimicrones ( $m\mu$ ), angstrom ( $\text{\AA}$ ) o nanómetros (nm). La *figura 1* muestra el espectro electromagnético, que comprende a la región ultravioleta entre otras.

La energía radiante puede obtenerse mediante el siguiente mecanismo: los átomos o moléculas se exponen a un calor intenso o a una descarga eléctrica, logrando absorber energía y alcanzando un estado de *"excitación"*. Para regresar a su estado normal, tienen que emitir la radiación absorbida. Esta emisión es el resultado de una transición del átomo o molécula de un estado de alta energía a uno de baja energía. La pérdida de energía en la transición es emitida en forma de luz, por lo que los átomos excitados producen espectros particulares.

Existen dos leyes que rigen la absorción de luz, la primera es la *Ley de Lambert* y establece que: *"la proporción de la luz absorbida por un medio transparente es independiente de la intensidad de la luz incidente y cada capa del medio, absorbe una fracción igual de la luz incidente"*. La relación se expresa en la siguiente ecuación como:

$$I = I_0 e^{-kdt} \quad \text{o} \quad \ln I/I_0 = -kdt \quad \text{Ec. 1.1}$$

donde:

$I$  = Intensidad de la luz transmitida a la distancia  $d$  a partir de la fuente,  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

$I_0$  = Intensidad de la luz incidente inicial,  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

$d$  = Espesor de la capa del líquido,  $\text{cm}$

$t$  = Tiempo de exposición,  $s$

La segunda ley es la *Ley de Beer* y está relacionada con el factor de concentración. Un fotón de luz será absorbido por una molécula sólo si choca con ella, la probabilidad de que ocurra una colisión es directamente proporcional al número de moléculas absorbentes que pasan a través de la luz. De acuerdo con esto, la *ley de Beer* establece que: "la cantidad de luz absorbida es proporcional al número de moléculas absorbentes a través de las cuales pasa la luz". La absorción de la solución, si la sustancia absorbente es disuelta en un medio transparente será proporcional a su concentración. La proporcionalidad a la concentración puede sustituirse en la *ley de Lambert* para dar la siguiente ecuación:

$$I = I_0 10^{-Edc} \quad \text{o} \quad \log I/I_0 = -Edc \quad \text{Ec. 1.2}$$

donde:

$d$  = distancia

$c$  = concentración de la sustancia que interfiere

$E$  = coeficiente de extinción

Las expresiones anteriores son equivalentes a la *ecuación 1.3* (Sánchez, 1991):

$$1/T = Edc \quad \text{Ec. 1.3}$$

donde:  $T$  = transmitancia

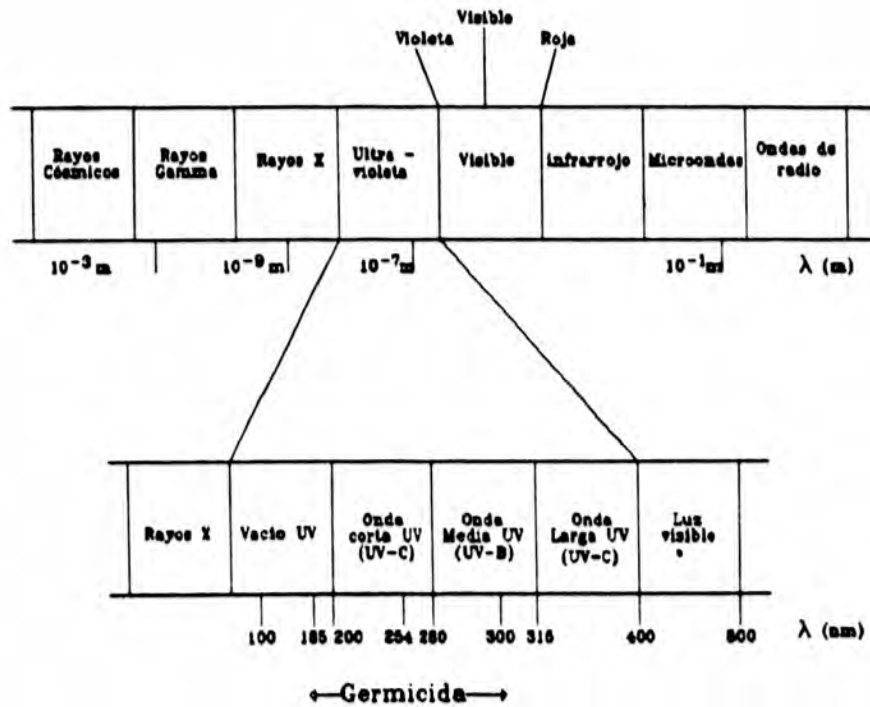


Fig. 1 Espectro electromagnético con escala expandida de radiación ultravioleta

Gross, T.S.C. y Murphy R. "Disinfection of Sewage Effluents: The Jersey Experience". Journal of the Institution of Water and Environment Management, JIEM 92. Conference Paper. 1993. p.481-491.

### 1.1 La luz ultravioleta y la fotoquímica

La radiación ultravioleta se localiza dentro del espectro electromagnético en la región de 100 a 400 *nm*. Sin embargo, sólo las longitudes de onda que se encuentran por debajo de 290 *nm* muestran un efecto biocida (el efecto mayor se logra alrededor de los 260 *nm*).

La luz ultravioleta o cualquier otra luz es considerada como una corriente de fotones, paquetes indivisibles de energía electromagnética. La energía contenida en un fotón varía directamente con su frecuencia e inversamente con su longitud de onda, se expresa mediante la ecuación:

$$E = hv = hc / \lambda \quad \text{Ec. 1.4}$$

donde:

$E$  = energía

$h$  = constante de Planck ( $6.6242 \times 10^{-27}$  erg.s)

$c$  = velocidad de la luz ( $2.9979 \times 10^{10}$  cm/s)

$\nu$  = frecuencia

$\lambda$  = longitud de onda

La energía asociada con una longitud de onda (*nm*) es:

$$E = 28591/\lambda \quad \text{Ec. 1.5}$$

La ley básica de la fotoquímica dice que: *"la luz absorbida causará un cambio físico o químico"*. De hecho los átomos y moléculas absorben sólo las longitudes de onda que proporcionan justamente la cantidad exacta de energía para cambiar su estado.

### 1.2 Desinfección por radiación ultravioleta

El término desinfección se refiere a la inactivación selectiva y/o destrucción de organismos precursores de enfermedades, a diferencia de la esterilización donde se lleva a cabo una destrucción total. Las cuatro categorías de organismos entéricos humanos que ocasionan mayores consecuencias en producir enfermedades son las bacterias, los virus, quistes de amibas y quistes de protozoarios (WERF, 1995).



Un desinfectante ideal debe poseer diversas características que lo identifiquen como eficiente, ver *tablas 1.1 a y b*. La desinfección es comúnmente realizada por el uso de agentes químicos o físicos. Los agentes químicos que han sido empleados para este fin incluyen al cloro y sus compuestos ( $\text{NaClO}$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{ClO}_2$ ), bromo, yodo, ozono, compuestos fenólicos, alcoholes y algunos metales pesados como la plata. De éstos, el cloro es el más conocido y el más utilizado, sobre todo en países en vías de desarrollo.

Las bacterias y otros organismos pueden ser también removidos por medios físicos (por ejemplo, por sedimentación y filtración) o bien mediante el uso de radiaciones como la ionización y la radiación electromagnética. Los rayos gamma (radiación ionizante), emitida de radioisótopos tales como el cobalto 60, han sido usados para desinfectar (esterilizar) tanto agua potable como agua residual. La radiación electromagnética usada para desinfección incluye a la radiación ultravioleta (UV) y al tratamiento térmico. La exposición a la luz UV inactivará algunos organismos, mientras que en el térmico (ejemplo, agua calentada al punto de ebullición) puede destruir la mayoría de los patógenos, bacterias formadoras y no formadoras de esporas.

### 1.2.1 Mecanismos de desinfección

Los principales mecanismos propuestos para explicar la acción de los desinfectantes incluye:

- Daño a la pared celular
- Alteración de la permeabilidad celular
- Alteración de la naturaleza coloidal del protoplasma
- Inhibición enzimática
- Daño al ácido desoxirribonucleico (ADN) y ácido ribonucleico (ARN) de la célula

El daño o destrucción de la pared celular ocasiona la muerte de los organismos. Algunos agentes, tales como la penicilina, inhibe la síntesis de la pared celular bactericida. Los compuestos fenólicos y detergentes alteran la permeabilidad de la membrana citoplásmica. Esas sustancias destruyen la permeabilidad selectiva de la membrana y permiten escapar a los nutrientes vitales, tales como nitrógeno y fósforo. El calor, la radiación y agentes altamente ácidos o alcalinos alteran la naturaleza coloidal del protoplasma. El calor coagula la proteína celular y los ácidos o las bases destruyen proteínas, produciendo un efecto letal.

El efecto germicida de la luz ultravioleta involucra el daño fotoquímico al ácido ribonucleico (ARN) y ácido desoxirribonucleico (ADN) en las células de un organismo. El ácido nucleico en los organismos son los absorbedores más importantes de la energía de la luz en un rango de longitud de onda de 240 a 280 nm. Debido a que el ADN y el ARN contienen la información genética para la reproducción, el efecto sobre esas sustancias puede inactivar efectivamente la reproducción celular. Esto se lleva a cabo debido a la dimerización de dos moléculas de piridina, *figura 2*. Los tres tipos principales de moléculas de piridina son la citocina (encontrada tanto en el ADN y en el ARN), tiamina (encontrada solamente en el ADN) y el uracil (encontrado solamente en el ARN).

### 1.3 Ventajas y desventajas de la radiación UV

La desinfección UV tiene las siguientes ventajas sobre la desinfección con cloro y/o ozono. Nótese que en algunos casos esas ventajas se aplican tanto a desinfección de agua potable como agua residual, mientras que en otros son en su forma muy particular:

#### Ventajas:

- No forma residuales tóxicos para organismos acuáticos
- No forma subproductos
- No necesita transporte, almacenamiento o uso de productos peligrosos como el cloro
- No es inflamable o explosivo
- Emplea rangos de dosis muy pequeñas entre organismos resistentes y susceptibles

#### Desventajas:

- Alto consumo de energía (3 a 4 veces más que el cloro)
- No presenta un efecto residual
- Puede presentar efecto de fotorreactivación
- En México no se cuenta con amplia experiencia

La *tabla 1.2* presentan algunos ejemplos de organismos y el tiempo de contacto necesario para lograr una reducción efectiva a una intensidad UV baja.

Tabla 1.1 a Comparación de características ideales y actuales de desinfectantes comúnmente usados

Características	Propiedades/ reacción	Cloro	Hipoclorito de sodio	Bióxido de cloro
Disponibilidad	Debe ser disponible en grandes cantidades y precios razonables	Bajo costo	Costo moderadamente bajo	Costo moderadamente bajo
Capacidad deodorizante	Deodoriza mientras desinfecta	Alta	Moderada	Alta
Homogeneidad	La solución debe ser uniforme en composición	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo
Interacción con materiales extraños	No debe ser absorbida por otra materia orgánica que por células bacteriales	Oxida materia orgánica, también absorbido por orgánicos	Oxidante activo	Oxidante activo
No corrosivo	No descompone metales	Altamente corrosivo	Corrosivo	Altamente corrosivo
No tóxico a altas formas de vida	Es tóxico a microorganismos y no tóxico a humanos ni a otros animales	Altamente tóxico a formas de vida muy altas	Tóxico	Tóxico
Penetración	Tiene la capacidad de penetrar a través de la superficie	Alta	Alta	Alta
Peligrosidad	Debe ser seguro para transportarse, almacenarse, manejarse y usarse	Alto riesgo	Riesgo moderado	Alto riesgo
Solubilidad	Debe ser soluble en agua o en el tejido celular	Ligero	Alta	Alta
Estabilidad	Pérdida de acción germicida	Estable	Ligeramente inestable	Relativamente estable
Toxicidad a microorganismos	Debe ser altamente tóxico a altas diluciones	Alta	Alta	Alta
Toxicidad a temperatura ambiente	Es efectivo en rangos a temperatura ambiente	Alta	Alta	Alta

<sup>a</sup> Penetración de bacteria

Fuente: WERF. "Comparison of UV irradiation to chlorination: Guidance for Achieving Optimal UV Performance. Disinfection". Water Environment Research Foundation. 1995

Tabla 1.1 b Comparación de características ideales y actuales  
de desinfectantes comúnmente usados

Características	Propiedades/ reacción	Ozono	Radiación ultravioleta
Disponibilidad	Debe ser disponible en grandes cantidades y precios razonables	Costo moderadamente alto	Costo moderadamente alto
Capacidad deodorizante	Deodoriza mientras desinfecta	Alta	No aplica
Homogeneidad	La solución debe ser uniforme en composición	Homogéneo	No aplica
Interacción con materiales extraños	No debe ser absorbida por otra materia orgánica que por células bacteriales	Oxida materia orgánica	Absorbido por compuesto orgánicos específicos
No corrosivo	No descompone metales	Altamente corrosivo	No aplica
No tóxico a altas formas de vida	Es tóxico a microorganismos y no tóxico a humanos ni a otros animales	Tóxico	Tóxico a altas dosis
Penetración	Tiene la capacidad de penetrar a través de la superficie	Alta	Altamente seguro
Peligrosidad	Debe ser seguro para transportarse, almacenarse, manejarse y usarse	Riesgo moderado	Bajo riesgo
Solubilidad	Debe ser soluble en agua o en el tejido celular	Baja	No aplica
Estabilidad	Pérdida de acción germicida	Inestable, debe ser generado al momento de usarse	Debe ser generado cuando se usa
Toxicidad a microorganismos	Debe ser altamente tóxico a altas diluciones	Alta	Alta <sup>a</sup>
Toxicidad a temperatura ambiente	Es efectivo en rangos a temperatura ambiente	Alta	Alta

<sup>a</sup> Penetración de bacteria

Fuente: WERF. "Comparison of UV irradiation to chlorination: Guidance for Achieving Optimal UV Performance. Disinfection". Water Environment Research Foundation. 1995

#### 1.4 Efecto de la luz UV sobre diferentes organismos

La mayoría de los organismos varían en sus respuestas a diferentes desinfectantes, ya que ésta se basa en las diferentes estructuras físicas internas de sus moléculas de ácido desoxirribonucleico (ADN) y ácido ribonucleico (ARN) de virus, protozoarios y nemátodos.

Tabla 1.2. Respuesta de organismos a diferentes tiempos de contacto con luz ultravioleta

Organismo	Tiempo de contacto, s	Organismo	Tiempo de contacto, s
E. coli	60	S.fecalis	165
Shigella spp	47	B. subtilis	240
S. tifoosa	49	B. subtilis spores	369

Fuente: Gher, Ronald, 1996

#### Sensibilidad de microorganismos a la desinfección UV

Los principales tipos de microorganismos que conciernen a la desinfección de agua potable y agua residual son las bacterias, virus, quistes de amibas y quistes de protozoarios. La mayoría de los desinfectantes son menos efectivos contra esporas bacterianas, virus y quistes de amibas y protozoarios que contra coliformes, organismos comúnmente usados como indicadores.

Debido a que la mayoría de los estudios virales han sido desarrollados bajo condiciones de laboratorio, existen datos limitados en cuanto a la inactivación para sistemas específicos en el tratamiento de agua residual. Con base en los datos disponibles, la efectividad relativa de la luz UV para algunos microorganismos y unidades virales con respecto a coliformes fecales, se reportan en la *tabla 1.3*. Al igual que con el cloro los quistes de protozoarios y amibas son los más difíciles de inactivar a través de la desinfección UV.

#### 1.5 Relación de dosis para UV

Los efectos germicidas de UV dependen de la dosis del agente desinfectante al cual los organismos son expuestos, ésta debe ser suficiente para causar el efecto germicida deseado.

La cantidad de energía UV germicida o dosis, se define como sigue:

$$D = I t \quad \text{Ec. 1.6}$$

donde:

$D$  = dosis UV,  $mW.s/cm^2$

$I$  = intensidad promedio de la energía UV germicida,  $mW/cm^2$

$t$  = tiempo de exposición,  $s$

Las lámparas de arco de mercurio de baja presión son el medio principal de generar energía UV utilizada para desinfección. Las lámparas de mercurio favorecen el mecanismo de desinfección ya que el 85% de la salida de luz es monocromática a una longitud de onda de 253.7 nm, la cual cae en un rango óptimo (250 - 279 nm) para efectos germicidas. Las dosis representativas para el caso de efluentes biológicos se dan en la *tabla 1.4*.

**Tabla 1.3. Efectividad relativa con respecto a coliformes fecales de desinfección UV para algunos sistemas biológicos**

Sistemas biológicos fecales	Dosis relativa para inactivar coliformes	
<b>Bacteria</b>		
Coliformes fecales	1.0	1.0
<i>Salmonella typhi</i>	1.0	0.9
<i>Staphylococcus aureus</i>	2.5	1.0 - 1.5
Coliformes totales	1.0	1.0
<b>Virus</b>		
Adenovirus	0.5	0.6 - 0.8
Coxsackie A-2	6 - 7	0.8 - 1.0
F-Bacteriófago específico	5 - 6	1.8 - 2.0
Polio 1	6 - 7	2.0 - 3.0

Fuente: WERF, 1995

Tabla 1.4 Dosis representativas de UV para diferentes efluentes

Desinfección UV		
Efluente típico	Dosis mW.s/cm <sup>2</sup>	Tiempo de contacto s
Filtros giratorios	15 - 130	7 - 14
Lodos activados	15 - 130	7 - 14
Lodos activados filtrados	40 - 200	7 - 21

Fuente: WERF, 1995

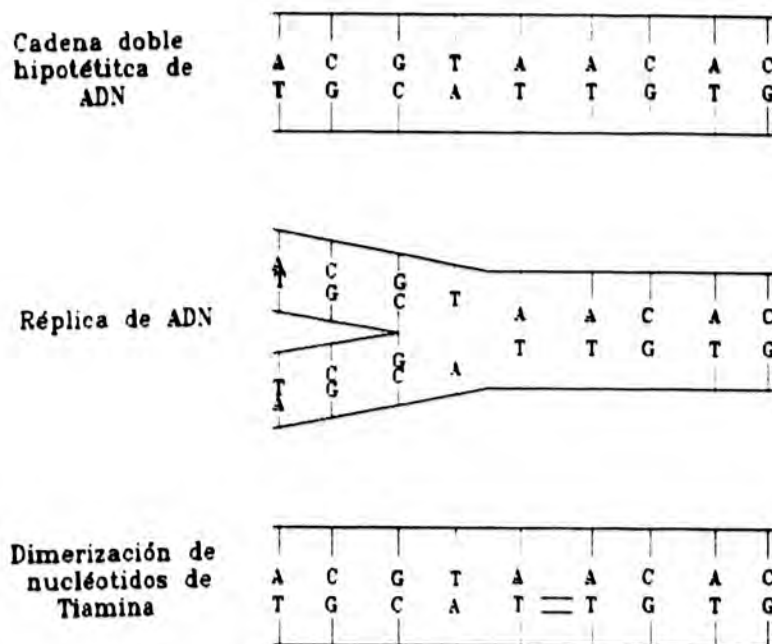


Fig. 2 Ejemplo de ADN y daño UV al ADN

Gher, Ronald. "Desinfección con UV y desinfección con OZONO". Conferencia. Ciudad Universitaria, UNAM. México. 1996

### 1.6 Tiempo de exposición

El tiempo de exposición en sistemas continuos de desinfección UV es una función del valor del flujo, el número de bancos empleados, la operación y el diseño del reactor. Los tiempos de exposición típicos, en flujo pistón horizontal y con un banco simple de tubos UV están en el orden de 5 a 7 segundos.

### 1.7 Efecto de las características del agua residual sobre la desinfección UV

El proceso de desinfección con luz UV se ve afectado por las características del agua residual tales como: *la turbiedad, la transmitancia, la concentración de sólidos suspendidos y la presencia de constituyentes que pueden precipitar*, (ver tabla 1.5). Algunos de los constituyentes encontrados en el agua residual pueden absorber la luz UV y por lo tanto disminuir la intensidad en el reactor.

Tabla 1.5 Impacto de las características del agua residual sobre la desinfección UV

Características del agua residual	Desinfección UV
Amonio DBO	- No hay o el efecto es menor - No hay o el efecto es menor. Sin embargo, si los compuestos orgánicos insaturados (o conjugados) y húmicos comprenden una gran porción de la DBO, la transmitancia de la luz UV puede ser disminuída.
Dureza	- Afecta la solubilidad de metales que pueden absorber luz UV, pueden permitir la precipitación de carbonatos sobre los tubos de cuarzo.
Materiales húmicos	- Absorbedores fuertes de luz ultravioleta.
Hierro	- Absorbedores fuertes de luz ultravioleta.
Nitritos	- No hay o el efecto es menor
Nitratos	- No hay o el efecto es menor
pH	- Puede afectar solubilidad de metales y carbonatos.
Sólidos suspendidos	- Absorción UV y protección sobre las bacterias incrustadas

Fuente: WERF, 1995

#### 1.7.1 Efecto del porcentaje de transmitancia sobre el agua residual

La capacidad de un agua residual para transmitir luz ultravioleta, definida como el porciento de transmitancia, es medida con un espectrofotómetro usando la misma longitud de onda como la que producen las lámparas UV (253.7 nm). Ciertos compuestos orgánicos e inorgánicos y sólidos suspendidos absorben o rechazan la luz ultravioleta afectando el



porcentaje de transmitancia, cuando ésta disminuye, el promedio de la intensidad UV en el reactor también disminuye. Los compuestos orgánicos e inorgánicos que absorben luz ultravioleta, absorben radiación ultravioleta como un fotón de una energía exacta.

De los compuestos inorgánicos, el hierro es considerado el más importante con respecto a la absorbancia ultravioleta ya que puede disminuir la intensidad de la luz UV en el sistema mediante tres formas: *Primero*, en forma disuelta, puede absorberla directamente; *segundo*, el hierro puede ser adsorbido en sólidos suspendidos, bacterias y otros compuestos orgánicos por lo que éste sorbido puede prevenir que la luz UV penetre en las partículas y por lo tanto inactive organismos; *tercero*, este metal puede precipitarse en los tubos de cuarzo que protegen las lámparas UV evitando que llegue la luz directamente al agua residual. Por otra parte, los principales compuestos orgánicos encontrados en agua residual, en concentraciones altas, que afectan la transmitancia significativamente incluyen a los agentes colorantes, tintas orgánicas y sustancias húmicas.

### 1.7.2 Efecto de los sólidos suspendidos (SS)

Los sólidos suspendidos pueden tener diversos efectos:

- Limitan la exposición de bacterias asociadas a partículas
- Provocan dispersión y absorción de radiación ultravioleta
- Penetración incompleta de luz UV que limita la exposición de bacterias asociadas a partículas grandes.

### 1.8 Reactivación de microorganismos

Uno de los fenómenos principales que se debe considerar en la desinfección por luz ultravioleta es la fotorreactivación, ya que algunos organismos (incluyendo humanos) han desarrollado enzimas las cuales responden a la luz solar. Existen dos mecanismos de reparación que se generan después de haber sido éstos irradiados por luz UV. Uno es la reparación en la obscuridad por nutrientes (energía), donde químicamente los ácidos nucleicos han sido dañados y se le denomina *excisión de reparación*. El segundo mecanismo es la *fotorreactivación*. En este caso, la dimerización de pirimidina inducida por la luz UV en el ADN puede ser fotorreversible por luz visible, la cual induce una serie de mecanismos enzimáticos de reparación que no requieren de un gasto de energía. La *monomerización de pirimidina* ocurre a longitudes de onda entre 300 y 500 nm, dependiendo del organismo en

particular y debe llevarse a cabo en un tiempo de 3 horas de inactivación. No todos los organismos pueden fotorreparar como son: *Streptomyces*, *Escherichia coli*, *Saccharomyces*, *Aerobacter*, *Micrococcus*, *Erwinia*, *Proteus*, *Penicillium* y *Nuerospora* (Gher,1996). Un estudio sistemático de fotorreactivación (Lindenauer, 1994) sugirió un esquema de la reacción en dos etapas como lo muestra la figura 3.

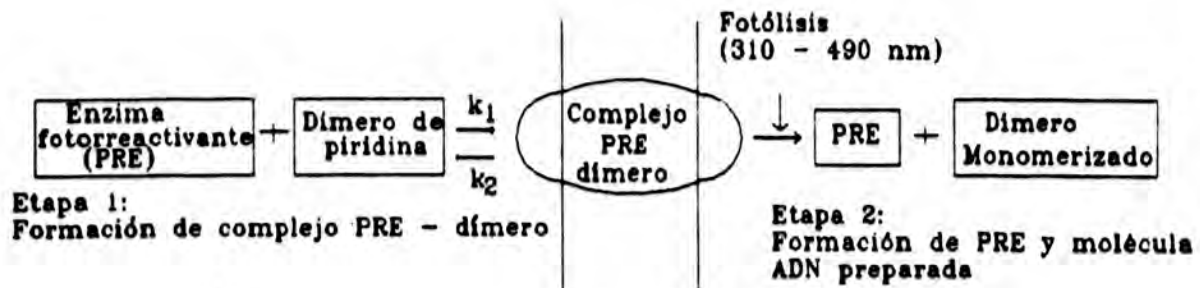


Fig. 3 Mecanismo de reacción propuesto en dos etapas para fotorreactivación

Lindenauer, Karl G., y Darby, Jeannie L. "Ultraviolet Disinfection of Wastewater: Effect of Dose on Subsequent Photoreactivation". Water Research. Vol. 28. No. 4. pp. 805 - 817. 1994

## CAPÍTULO 2

### SISTEMAS DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

---

Actualmente, existen diferentes tipos de configuraciones en los sistemas de desinfección por radiación ultravioleta (UV) que dependen de las características del efluente a tratar entre otras. A continuación se describen algunas configuraciones de sistemas así como aspectos tanto hidráulicos y de diseño experimental.

#### 2 Desinfección de agua residual por luz ultravioleta

En un sistema de tratamiento por radiación ultravioleta, la desinfección ocurre debido a la exposición del agua a determinadas condiciones específicas de intensidad y longitud de onda. En la práctica, la corriente fluye a través de una cámara de irradiación de acero inoxidable conocida comúnmente como "fotorreactor", siendo la parte esencial del sistema la *lámpara* que emite luz ultravioleta.

La desinfección por luz ultravioleta es un proceso físico que consiste en la transferencia de energía electromagnética de una fuente (*lámpara*) al material celular de los organismos (específicamente al material genético de la célula). El espectro de absorción del ácido desoxirribonucleico (ADN), como se ve en la *figura 4*, muestra un máximo de absorción entre 250 y 265 nm, esto implica un rango óptimo de longitud de onda para una efectividad germicida.

La fuente artificial primaria de esta energía UV es la lámpara de arco de mercurio de baja presión. Actualmente son las fuentes más efectivas y eficientes en los sistemas de desinfección. La razón principal para su aceptación es que aproximadamente el 85 % de su energía de salida es monocromática a 253.7 nm (*Water Disinfection, 1986*).

#### 2.1 Descripción general de sistemas ultravioleta

##### 2.1.1 Lámparas ultravioleta germicidas

La radiación ultravioleta puede ser producida artificialmente por lámparas de vapor de mercurio. La unidad de energía de radiación es medida en términos de *microwatts por unidad de área por unidad de tiempo*. Una lámpara de luz ultravioleta de 15 watt libera 38  $\mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$  de radiación

a una distancia de 1 m. La radiación ultravioleta es igual de efectiva para organismos *gram-positivos* que para *gram-negativos*. La dosis letal para la mayoría de los microorganismos, varía desde  $1800 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  hasta  $6500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  (Joklik, et al., 1980).

Actualmente se dispone de diversos tipos de lámparas, de las cuales la más común es la de vapor de mercurio, en la *tabla 2.1* se enlistan las intensidades características a diferentes longitudes de onda emitidas por lámparas comerciales de baja (35 watts) y media presión (550 y 7500 watts).

Una forma de incrementar la salida de la luz ultravioleta de una lámpara simple, es usar la de vapor de mercurio de media presión. Normalmente contiene argón el cual proporciona la descarga inicial y los medios de excitación de la pequeña cantidad de vapor de mercurio para establecer una descarga fosforescente de baja presión a 185 y 253.7 nm. Como resultado, se genera una corriente mucho más alta que la que emite una lámpara de baja presión causando que el tubo se caliente rápidamente y la presión de vapor del mercurio se incremente, permitiendo así la difusión típica del espectro de media presión.

La principal ventaja de un sistema de tubos de arco de media presión es la sensibilidad a las fluctuaciones de la temperatura del fluido que va a ser tratado. Los fluidos calientes y fríos pueden ser tratados con igual facilidad, mientras que las lámparas de baja presión necesitan estar cercanas a su temperatura óptima para operar eficientemente.

Se ha desarrollado una relación teórica lámpara/flujo como se ve en la *tabla 2.2* para la aplicación de una fuerte dosis de radiación ultravioleta, basada en diferentes rangos de flujo de agua pura para una dosis inicial de radiación ultravioleta de 16 y  $20 \mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ .

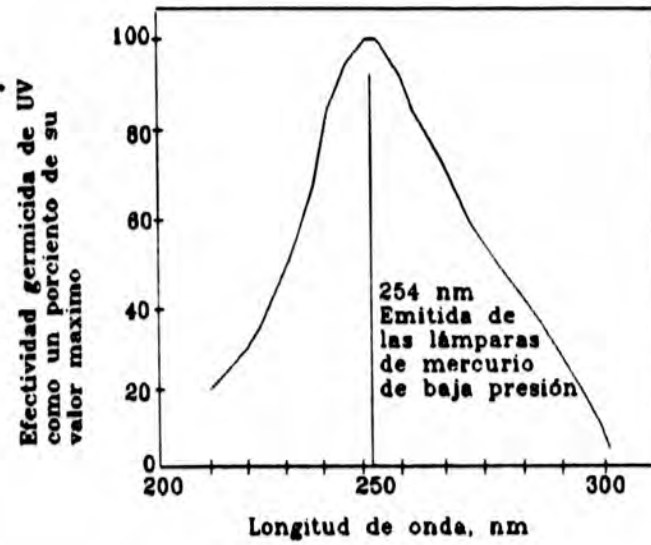


Fig. 4 Efectividad germicida relativa de energía radiante. Espectro de absorción de ADN

Water Disinfection. "Ultraviolet Light Disinfection of Wastewater". Manual of Practice FD-10, WPCF, 1986

Tabla 2.1 Intensidad de luz emitida por las lámparas de vapor de mercurio en función de la longitud de onda y el tipo de lámpara.

Longitud de Onda, (nm)	Intensidad, W		
	Baja presión (35 W)	Media presión (550 W)	Media presión (7500 W)
<b>Infrarrojos</b>			
1367.3	--	4.6	39.3
1128.7	--	3.8	46.2
1014.0	--	12.2	165.0
<b>Visible</b>			
578.0 (amarillo)	3.04	29.0	297.0
546.1 (verde)	0.26	28.2	290.0
435.8 (azul)	0.30	23.3	216.0
404.5 (violeta)	0.12	12.7	150.0
<b>Ultravioleta</b>			
366.0	0.16	30.1	443.0
334.1	0.01	2.8	46.6
313.0	0.18	15.0	270.0
302.5	0.02	8.2	117.6
296.7	0.06	5.0	66.9
289.4	0.01	1.8	21.0
280.4	0.01	2.8	63.9
275.3	0.01	0.8	21.6
270.0	--	1.2	22.9
265.2	0.02	4.6	158.0
257.1	--	1.8	31.0
259.7	90.0	5.0	197.0
248.2	--	2.6	41.8
240.0	--	2.2	31.9
292.0	--	2.4	91.2
184.9	1.80	0.3	8.2
<b>Intensidad total</b>	<b>32.30</b>	<b>95.2</b>	<b>1619.1</b>

Fuente: Sánchez Rodríguez, Narda. " Análisis comparativo de las tecnologías de ozonación y radiación ultravioleta como alternativas a la cloración en el tratamiento de agua municipal ". Tesis, UNAM. 192 p. 1991

Tabla 2.2 Relación teórica lámpara/flujo

Tubo de arco simple	Flujo máximo de agua pura (GPM)	
	16 $\mu$ W.s7cm <sup>2</sup>	20 $\mu$ W.s7cm <sup>2</sup>
30.0 W Baja presión	9	4
0.5 kW Media presión	100	50
1.0 kW Media presión	160	80
2.0 kW Media presión	450	250
	1600	840

Fuente: *Sánchez, 1991*

Las lámparas germicidas ultravioleta son muy similares en forma física a los tamaños correspondientes de las fluorescentes ordinarias y tienen exactamente las mismas características eléctricas, en la *tabla 2.3* se muestran algunas de ellas.

Tabla 2.3 Características de las lámparas de mercurio de baja presión

Watts normal	30.00	15.00	8.00	4.00
Longitud (cm)	91.44	45.72	30.48	14.61
Diámetro (cm)	2.54	2.54	1.59	1.27
Salida U.V. a 2537 ° A (w)	8.30	3.60	1.30	0.50
Microwatts por cm <sup>2</sup> a 1 m	85.00	38.00	14.00	7.00

Fuente: *Koller, 1965*

La lámpara germicida de 15 w es de forma tubular, cuyas dimensiones son 45.72 cm de largo y 2.54 cm de diámetro con un cátodo en ambos lados. Opera a una corriente de arco de 0.31 amp con un voltaje de 55 volts. Está diseñada para una temperatura de la pared del bulbo de 40°C. Una de 15 watts, tiene un bulbo que transmite ultravioleta y no está cubierto por los lados con material fluorescente. Las lámparas de 30 y 8 watts tienen las mismas características de operación y dimensiones, que las fluorescentes. La de 4 watts tiene el mismo principio que las de mayor tamaño pero varía por su forma en "U". Ésta tiene una longitud de 14.61 cm y una amplitud de 2.54 cm. Su salida es aproximadamente de una tercera parte de la de 8 watts.

Las características de radiación son similares para todas las lámparas. El total de salida aumenta ligeramente más rápido que los watts de entrada.

La *tabla 2.3* muestra la eficiencia extremadamente alta de las lámparas para la producción de radiación a 2537  $\text{\AA}$ . Para propósitos prácticos, pueden ser consideradas como fuentes monocromáticas de 2537  $\text{\AA}$ , desde más del 90% de la energía radiada en la luz visible y la ultravioleta está concentrada en una sola línea.

### 2.1.2 Efecto germicida de la longitud de onda

La acción bactericida de la luz solar fue descubierta por el inglés Downes y Blunt en 1877, a partir de ello, el efecto de la radiación sobre la bacteria se ha estudiado cuidadosamente por lo que la relación entre la acción letal y la energía es ahora bien conocida. La correspondencia entre el efecto bactericida y la longitud de onda se muestra en la curva de la *figura 5*. Esta curva tiene un máximo a 2600  $\text{\AA}$  y cae prácticamente de 0 a 3200  $\text{\AA}$ . Luckiesh la extendió más allá de 3200  $\text{\AA}$  y mostró que la efectividad a 3200  $\text{\AA}$  es de 0.4% del valor pico y a 7000  $\text{\AA}$  es de 0.002%. Una consecuencia del pico en la curva a 2600  $\text{\AA}$  es que las lámparas de mercurio de baja presión, con su salida a 2573  $\text{\AA}$  cierran este pico y son agentes bactericidas muy eficientes. El 90% de la salida de radiación visible y ultravioleta de esas lámparas se concentra en una sola línea, la cual cierra el punto de efectividad bactericida máxima, el resto de la radiación puede ser omitida (*Koller, 1965*).

Cuando la bacteria se sujeta a un agente como el calor, desinfectantes químicos y luz ultravioleta, no todas mueren a la primera exposición, sólo una fracción constante de ellas muere en cada incremento de tiempo. La fracción del número presente inicial, la cual sobrevive a algún tiempo dado, es llamado el valor de sobrevivencia. La fracción eliminada es 1 menos la fracción sobreviviente. Esas cantidades son expresadas en porciento multiplicado por 100. El valor de sobrevivencia es una función exponencial del tiempo de exposición y la intensidad del agente letal.

La efectividad del agente está en función de la dosis requerida para producir un valor de sobrevivencia dado. En la eliminación por radiación UV, la intensidad de radiación se da en microwatts por centímetro cuadrado y  $k$  es una constante que depende de la naturaleza del organismo y la longitud de onda de la radiación.



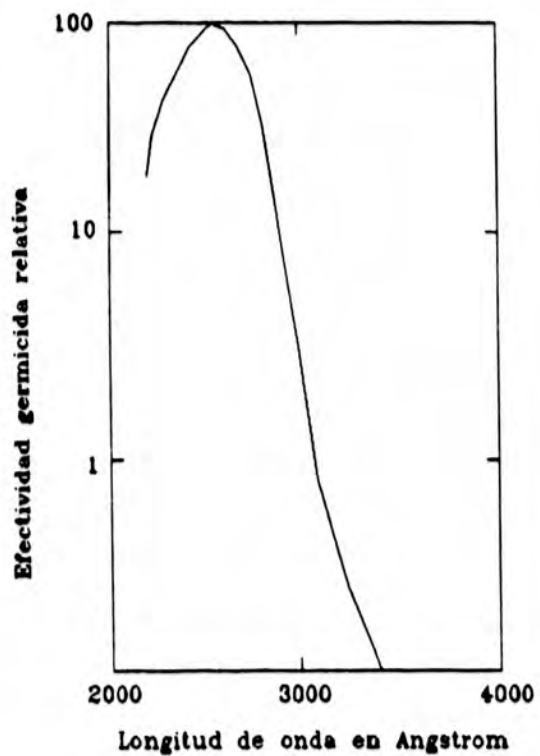


Fig. 5 Curva de efectividad bactericida

Koller, Lewis Richard. "*Ultraviolet radiation*". Segunda Edición. New York, J. 312 p. 1965

## 2.2 Aspectos hidráulicos de unidades de desinfección ultravioleta

La desinfección de agua residual tratada por luz UV ha ido aumentando como alternativa a los procesos tradicionales de cloración. La Agencia de Protección Ambiental (*EPA*) ha jugado un papel importante en la obtención de lineamientos para desarrollar alternativas soportando la investigación y demostración de nuevas aplicaciones de éstas (*Kreft, et al., 1986*).

### 2.2.1 Diseños típicos de reactores UV

Existen dos diseños típicos para desinfectar agua residual por luz UV. Uno es denominado *unidad de tubo*, que emplea polímeros fluorocarbonados para transportar el agua residual. Las lámparas UV se colocan por fuera de los lados y paralelos a los tubos para que la luz UV penetre a través de ellos y entre el fluido. El otro, es llamado *unidad de cuarzo*, utiliza tubos de cuarzo con chaquetas para aislar las lámparas UV del agua residual.

#### 2.2.1.1 Configuración de los reactores UV

Existen dos diseños de reactores UV básicos; en uno, las lámparas pueden estar suspendidas fuera del líquido a ser tratado y en otro sumergido en el líquido. El objetivo de esta configuración es que el líquido aproveche la energía tan eficiente como sea posible. El otro es un reactor de contacto, en el cual las lámparas son sumergidas al mismo tiempo en el agua residual. Para minimizar los efectos de enfriamiento del agua, las lámparas son protegidas con chaquetas de cuarzo que son sólo ligeramente más grandes de diámetro que las lámparas. En un reactor donde la lámpara no interacciona con el agua, ésta se encuentra suspendida arriba del líquido o alrededor de los conductos que lo transportan. Esos conductos son transparentes a la radiación.

Los sistemas de cuarzo sumergidos pueden tomar diferentes configuraciones, generalmente descritas por el arreglo de las lámparas respecto a la dirección del flujo y al diseño hidráulico del reactor, como lo muestra las *figuras 6a, b y c*.

### a) Unidad de tubo

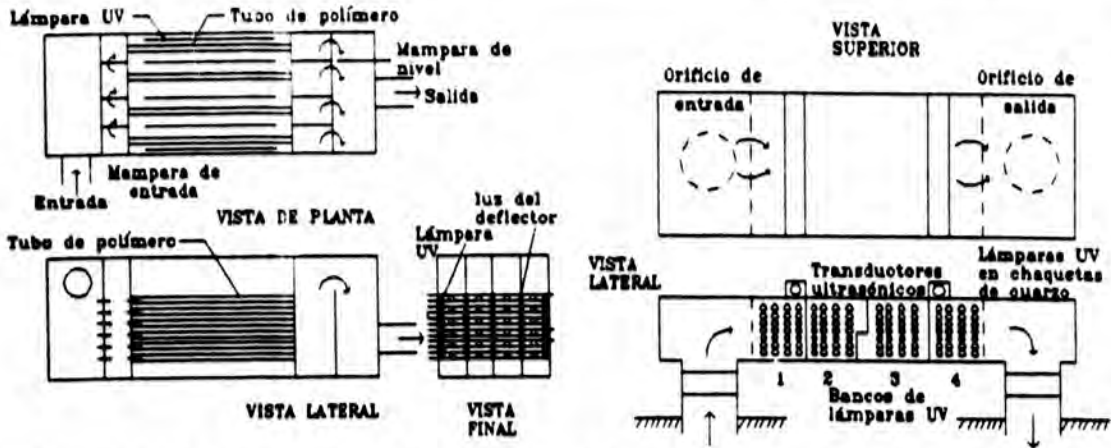
La geometría ideal de un sistema, con simplicidad de diseño y efectividad en el uso de la energía ultravioleta, es la *unidad de tubo* que usa una sola lámpara que corre a lo largo de los ejes de una cámara de radiación cilíndrica separada del agua por medio de una camisa de cuarzo (el cuarzo es usado en estas unidades por su alta transmisividad a la luz ultravioleta. También son muy usados el polímero de fluorocarbón y el teflón). En esta configuración la energía radiante pasa a través del agua y las significantes pérdidas de radiación por la absorción de los reflectores alternativos se evitan. Este fororreactor puede manejar un flujo en el rango de 50 a 3400 l/min y el tubo de arco de alta intensidad puede emitir tanta energía como la de 36 tubos de arco de baja presión. En este tipo de unidad se eliminan los problemas del monitoreo de la intensidad de salida de las lámparas, ya que una sola puede monitorearse fácilmente con un sensor ultravioleta montado sobre la pared de la cámara como se ve en la *figura 7*. El sistema puede operar totalmente automatizado sin necesidad de supervisión o mantenimiento constante.

Para el tratamiento de flujos mayores a 95 l/min se requiere de un sistema que conste de múltiples cámaras en las que cada una contiene una lámpara y una unidad de monitoreo, éstas se pueden arreglar en diferentes configuraciones (serie, paralelo), la mitad de las cámaras están conectadas una bomba de abastecimiento la cual es controlada por dispositivos sensibles al nivel de los tanques de almacenamiento.

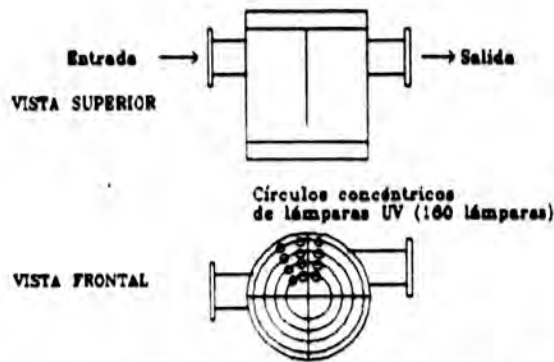
### b) Unidad de tubos múltiples

Existen diferentes diseños de unidades con tubos múltiples, el primero es un fotorreactor en el cual el fluido pasa a través de la cámara en forma de una película delgada y es expuesto a la radiación ultravioleta emitida por lámparas especiales a poca distancia sobre el fluido. En principio, este diseño da una luz de alta intensidad, pero las lámparas adyacentes reabsorben la radiación emitida. La principal desventaja de este diseño es que sólo es adecuado para desinfectar agua de muy alta calidad. Otro diseño, es aquel en el que el agua a desinfectar fluye dentro de los tubos de teflón los cuales están rodeados en el exterior por la fuente ultravioleta. La luz penetra el tubo de teflón y es absorbida por el fluido.

El tipo de fotorreactor de tubos múltiples más común es el que contiene bancos de lámparas colocadas entre tubos a través de los cuales fluye el agua que va a ser desinfectada, ellas están protegidas por camisas de cuarzo y conectadas a un cabezal con varios arreglos. Este tipo de cámara es parecida a un intercambiador de calor de tubo y coraza protegida contra corrosión, por ejemplo por aluminio, acero inoxidable o por cloruro de polivinil, preferidos como materiales estructurales y de cubierta. En estos sistemas existe gran dificultad con los dispositivos de limpieza y si el equipo opera sucio, se tiene como resultado una desinfección pobre. En la *tabla 2.4* se muestran las ventajas de los tubos de arco de media presión comparados con las lámparas convencionales de baja presión.



a) Esquema de unidad UV con tubo de polímero en Eden, Wis. U.S.A. b) Esquema de unidad UV de cuarzo en Suffern, N.Y. U.S.A.



c) Esquema de unidad de cuarzo UV en Vinton, Iowa. U.S.A.

Fig. 6 Ejemplos de reactores ultravioleta, localizados en Estados Unidos.

Kreft, Peter., Scheible, O. Karl y Venosa, Albert. "Hydraulic studies and cleaning evaluations of ultraviolet disinfections units" J. Water Pollution Control Fed., Vol 58, No. 12. pp 1129-1137. 1986.

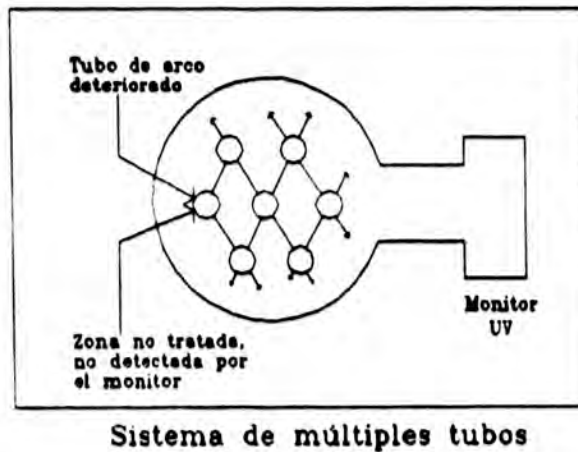
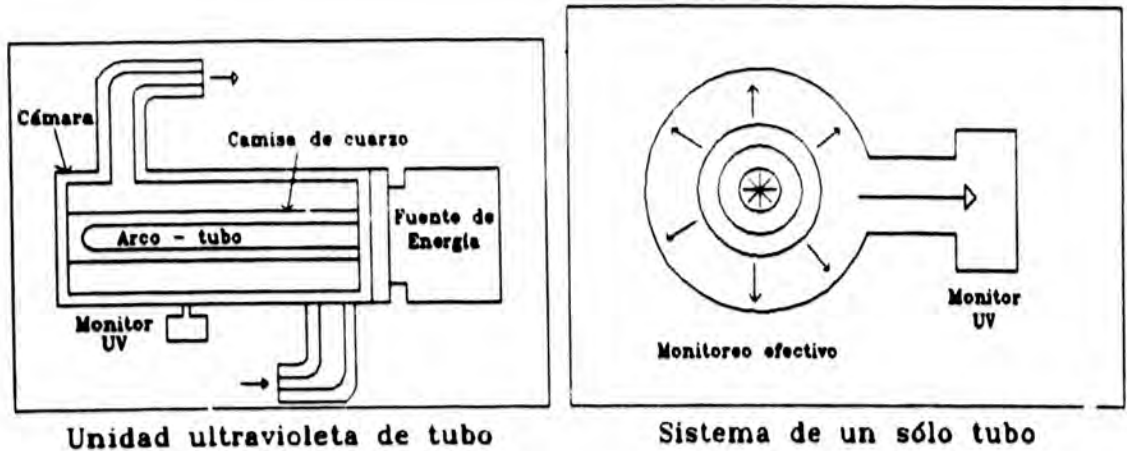


Fig. 7 Diseños típicos de reactores ultravioleta

Sánchez R., Narda. " Análisis comparativo de las tecnologías de ozonación y radiación ultravioleta como alternativas a la cloración en el tratamiento de agua municipal ". Tesis, UNAM. 192 p. 1991.

Tabla 2.4 Comparación de tubos de arco de media y baja presión

Tubos de arco de media presión	Lámparas convencionales de baja presión
1) Poder de salida: 1720 W/m El tubo de arco de media presión es 25 veces más poderoso.	67 W/m
2) No son afectados por el fluido o por la temperatura atmosférica.	El uso de las lámparas de baja presión se recomiendan para su uso entre 1.67 y 37.78 °C con pérdida de la intensidad si no se mantiene la temperatura de operación óptima de 40.56 °C.
3) Un tubo de arco por cámara ofrecen ventajas en el diseño, mantenimiento (cambio de lámparas en cinco minutos), se evita la absorción de energía UV por las lámparas adyacentes, el monitoreo es constante para toda la cámara.	Se requieren de más de 25 lámparas de baja presión para igualar a un tubo de arco de media presión, no pueden ser monitoreados para una dosis total, emiten una banda estrecha de luz ultravioleta menos efectiva. Se requiere también de una camisa de cuarzo por tubo causando la necesidad de mantenimiento y limpieza adicional.
4) Menor costo de operación y mantenimiento debido al diseño simple.	Los costos de operación y mantenimiento son mayores debido a la cantidad de lámparas y camisas que requiere el sistema.
5) El diseño permite que en la cámara exista una alta turbulencia.	Las lámparas de baja presión hacen que la cámara sea muy larga para que el fluido alcance a recibir la dosis necesaria.
6) Consumo de energía: 2.5 kW	1.9 kW

Fuente: Sánchez Rodríguez, Narda. " Análisis comparativo de las tecnologías de ozonación y radiación ultravioleta como alternativas a la cloración en el tratamiento de agua municipal ". Tesis, UNAM. 192 p. 1991

## 2.3 Consideraciones para el diseño matemático de un reactor UV

### 2.3.1 Inactivación de bacterias

La inactivación de bacterias por radiación ultravioleta puede ser aproximada por la siguiente ecuación cuya reacción se considera de primer orden:

$$N = N_0 e^{-k_d I t} \quad \text{Ec. 2.1}$$

donde:

$N$  = densidad bactericida después de ser expuesta a UV, *organismos/cm<sup>3</sup>*

$N_0$  = densidad bactericida inicial, *organismos/cm<sup>3</sup>*

$k_d$  = constante de inactivación, *cm<sup>2</sup> / μWs ó m<sup>2</sup>/J*

$I$  = intensidad de la energía UV germicida, *μW / cm<sup>2</sup> ó W/m<sup>2</sup>*

$t$  = tiempo de exposición, *s*

La intensidad  $I$ , es el valor al cual la energía es liberada hacia el líquido y típicamente tiene las unidades de microwatts por centímetro cuadrado ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ). Multiplicando el tiempo de exposición por la intensidad, da la cantidad de energía o dosis según ecuación:

$$\text{Dosis } (\mu\text{W s}/\text{cm}^2) = \text{Intensidad } (\mu\text{W}/\text{cm}^2) \times \text{Tiempo } (s) \quad \text{Ec. 2.2}$$

Aunque la expresión de primer orden es una buena aproximación de la respuesta a la dosis, existen pruebas directas sobre mezcla de cultivos que muestran una reducción en la eficiencia con el incremento de la dosis. En el caso de la desinfección ultravioleta de aguas residuales tratadas, generalmente se le atribuye la *agregación* o la *oclusión* de bacterias en materia particulada. La luz UV es incapaz de penetrar en este material y por lo tanto inactivar a la bacteria. De este modo, aunque los microorganismos se encuentren en forma individual o dispersos, con un incremento en la dosis habrá una disminución de respuesta ya que las bacterias activas son protegidas por las partículas. Por lo que la *ecuación 2.1* puede ser modificada de la siguiente manera:



$$N = N_0 e^{-k_d t} + N_p \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde:

$N_p$  = densidad bactericida asociada con las partículas

En los sistemas ultravioleta, aunque la finalidad es obtener un tiempo de exposición  $t$ , para todos los elementos que pasan a través del reactor, hay de hecho una distribución alrededor del valor ideal. Esta distribución es una función de las características de dispersión del reactor, la cual puede ser cuantificada definiendo la magnitud de dicha distribución. El estudio reportado por Scheible (*Water Disinfection, 1986*), sugirió una solución simplificada que incorpora los efectos de dispersión en la ecuación 2.3, obteniendo así la siguiente ecuación:

$$N = N_0 \exp \left( \frac{ux}{2E} \left( 1 - \left( 1 + \frac{4k_d E}{u^2} \right)^{1/2} \right) \right) + N_p \quad \text{Ec. 2.4}$$

La primer parte de la expresión incorpora los elementos de tiempo e intensidad para predecir el comportamiento en los sistemas de desinfección. La segunda es una estimación de la densidad de coliformes que puede estar asociada a las partículas en el agua residual. La ecuación anterior forma la base para diseños de sistemas desinfección con UV.

En la ecuación 2.4 se tiene que:

$E$  = coeficiente de dispersión, puede ser aproximado de la curva del tiempo de distribución de un sistema en particular,  $cm^2/s$

$N_p$  = densidad de coliformes asociada con las partículas e inafectada por exposición UV.

$x$  = distancia que recorre una partícula a través del sistema, la cual se encuentra expuesta directamente a la luz UV,  $cm$

$u$  = velocidad del agua residual a través del reactor UV,  $cm/s$

La velocidad puede ser calculada de acuerdo a la siguiente expresión:

$$u = x / \left( \frac{V_0}{Q} \right) \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde:

$V_0$  = volumen vacío del reactor UV, l

$Q$  = flujo total, l / s

### 2.3.2 Constante de inactivación $k_d$

La constante de inactivación  $k_d$  se expresa como una función de la intensidad de la luz UV. De este modo, a un tiempo de exposición dado, la constante de inactivación aumentará (o disminuirá) con un incremento (o disminución), respectivamente de la intensidad. Con base a lo anterior puede desarrollarse una ecuación en la cual  $k_d$  puede ser estimada como una función de la intensidad:

$$k = f(\text{intensidad})$$

Esta correlación puede ser desarrollada relacionando el  $\log k$  y  $\log I$ , donde la intensidad es un promedio de ésta en el reactor,  $I_{prom}$ . Esto nos lleva a la expresión:

$$k = a I_{prom}^b \quad \text{Ec. 2.6}$$

Donde:

$a$  y  $b$  es la pendiente e interceptor en la regresión lineal

La densidad bacteriana de partículas,  $N_p$ , es generalmente descrita como una función de algún índice de medición de la densidad de partículas en un agua residual, tal como los sólidos suspendidos (SS) o la turbiedad. Los sólidos suspendidos son generalmente usados debido a que son un parámetro comúnmente medido y muy relevante en las aplicaciones del tratamiento de agua residual. El valor de  $N_p$  es descrito como una función de los sólidos suspendidos por la correlación del logaritmo de la densidad de coliformes del efluente y el log de los sólidos suspendidos. Cuando se transforma, la expresión queda de la siguiente forma:

$$N_p = c SS^m \quad \text{Ec. 2.7}$$

Donde:

$SS$  = concentración de sólidos suspendidos,  $mg/l$

$c, m$  = coeficientes empíricos

La densidad del efluente para cada análisis debe ser generado bajo condiciones de dosis muy altas. Por lo que se supone que las bacterias que permanecen son aquellas que están ocluídas en la materia particulada y no son afectadas por la radiación UV.

Sustituyendo la ecuación 2.6 y 2.7 en la Ec. 2.4, se obtiene la siguiente ecuación:

$$N = N_o \exp \left( \frac{UX}{2E} \left( 1 - \left( 1 + \frac{4EaI_{prom}^b}{U^2} \right)^{1/2} \right) \right) + cSS^m \quad \text{Ec. 2.8}$$

Para propósitos experimentales pueden emplearse los siguientes coeficientes:  $a = 0.000014$ ;  $b = 1.3$ ;  $c = 0.25$ ;  $m = 20$  y  $E = 100 \text{ cm}^2/\text{s}$  (*Water Disinfection, 1986*). Aunque, éstos deben ser confirmados mediante pruebas directas.

## 2.4 Consideraciones para el diseño hidráulico de un reactor UV

### 2.4.1 Teoría de la hidráulica de diferentes unidades UV

El conocimiento de la hidráulica de una unidad de desinfección UV es importante para realizar un diseño efectivo. *Primero*, bajo condiciones ideales una unidad UV debe tener las características de un *reactor flujo pistón* en el cual, cada elemento del fluido pase a través del reactor permaneciendo en él por un mismo período de tiempo; *segundo*, para la unidad UV *el movimiento de flujo debe ser turbulento* en la dirección del flujo. Logrando estos dos objetivos se puede asegurar que cada elemento de agua recibirá la misma intensidad promedio total de radiación. La importancia en estos requerimientos se debe a que la dispersión axial produce un patrón de flujo no ideal o dispersivo. *Tercero*, debe hacerse *uso máximo del volumen total del reactor* que contienen las lámparas UV. Los espacios deben ser minimizados de tal manera que

el volumen efectivo sea muy cercano al volumen real de radiación UV. Esto optimizará el uso de energía.

Una situación ideal para conocer el comportamiento hidráulico de un reactor es aquella en la cual los perfiles de velocidad se conocen en algún punto del reactor. La mayoría de las veces esto no es posible y por lo tanto, las características del flujo son descritas por la distribución del tiempo de residencia (*RTD*). Si la consideración se da en el tiempo en que cada elemento permanece en el reactor, la distribución de esos elementos con el tiempo forma la curva *RTD*.

La *figura 8* muestra una curva representativa que puede determinarse inyectando un trazador conservativo en el influente del reactor y midiendo su concentración (*C*) a la salida del mismo, con respecto al tiempo.

## 2.4.2 Características de flujo

### 2.4.2.1 Distribución del tiempo de residencia (*RTD*)

La evaluación de un reactor específico radica principalmente en la obtención de la curva de distribución del tiempo de residencia (*RTD*) apropiado para la configuración de éste. Ésta proporciona información anticipada o actual sobre el comportamiento hidráulico del sistema y puede emplearse como una herramienta en el diseño. Experimentalmente, el desarrollo de la curva es estrictamente continua y para la obtención de la misma es necesario suministrar una sustancia que sea conservativa (no reactiva) en el influente del reactor en una forma de pulso o en etapa. Los trazadores comunes son una sal (*NaCl*) o un colorante fluorescente. Estos son medidos en el efluente para su análisis subsecuente o por medición directa en la corriente.

La forma de la curva y la distribución de su área describirá las características hidráulicas e indicará si cumple con los criterios de diseño para un proceso de desinfección. La *figura 9* muestra curvas de *RTD* para tres flujos diferentes; el caso ideal es el flujo pistón. La respuesta a la entrada del pulso es un pico de amplitud esencialmente cero. Esta idealidad no se da en aplicaciones prácticas, existirá con algún grado de dispersión tal que la amplitud de la curva del flujo pistón se expandirá.

El objetivo del diseño hidráulico de un sistema debe minimizar el grado de esta tendencia en la curva. Diversos valores numéricos pueden ser estimados para caracterizar la curva de un sistema en particular. La curva *RTD* en la *figura 9d* es una respuesta hipotética a una entrada de pulso para un reactor dado. Primero el tiempo de residencia teórico,  $T$ , del reactor es definido como el volumen efectivo,  $V_e$ , dividido por el valor del flujo,  $Q$ :

$$T = V_e / Q \quad \text{Ec. 2.9}$$

#### 2.4.2.2 Tiempo de residencia promedio ( $t_m$ )

El tiempo de residencia promedio  $t_m$ , es el valor medio o el centroide de la distribución, el cual puede ser aproximado sumando las áreas como intervalos de tiempo discreto:

$$t_m = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} \quad \text{Ec. 2.10}$$

Donde:

$C_i$  = concentración inicial del trazador

$t_i$  = tiempo inicial al cual se mide el trazador

#### 4.2.3 Varianza de la curva *RTD*

Otra característica importante dentro de la hidráulica del reactor es la varianza y puede ser obtenida de los datos de trazado empleando la siguiente ecuación:

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - t_m^2 \quad \text{Ec. 2.11}$$

De la curva RTD se pueden obtener los siguientes parámetros:

- $t_i$  = tiempo al cual aparece por primera vez el trazador
- $t_p$  = tiempo al cual se observa la concentración pico del trazador
- $t_{10}$  = tiempo al cual el 10% de trazador ha pasado a través del reactor
- $t_{50}$  = tiempo al cual el 50% de trazador ha pasado a través del reactor
- $t_m$  = tiempo medio (centroide) de la curva
- $T$  = tiempo teórico medio ( $V/Q$ )
- $t_{90}$  = tiempo al cual el 90% de trazador ha pasado a través del reactor

Los parámetros antes descritos pueden ser combinados para formar una serie de índices los cuales describen el comportamiento hidráulico del reactor. En la evaluación de reactores específicamente diseñados para desinfección por radiación ultravioleta, las áreas críticas de la curva *RTD* son las porciones iniciales y la relación entre el tiempo de residencia medio y el teórico.

- $t_i / T$  mide los cortos circuitos más severos. En un reactor de flujo pistón ideal la relación vale 1 y tiende a 0 conforme aumenta el mezclado.
- $t_p / T$  indica la presencia de áreas muertas. Esto proporciona un estimado del volumen real del reactor, la relación se aproxima a 1 en un reactor de flujo pistón y tiende a 0 con el aumento del mezclado.
- $t_{90} / t_{10}$  es el *Índice de Dispersión de Morill*. Es la relación del tiempo para el cual el 90% del trazador ha pasado a través del sistema con respecto al del 10%. Esto es una medida de la amplitud de la curva en la cual un valor de 1 indicará un flujo pistón ideal y 21.9 un mezclado ideal.
- $t_m / T$  para algún reactor, será igual a 1; esto implica que el volumen del reactor es usado al 100%. Cuando este valor es significativamente  $< 1$ , el volumen efectivo será mucho menor que el volumen real. Por definición la relación  $t_m / T$  no pueda ser más grande que 1.
- $t_{50} / t_m$  mide la relación de la media al centro de la curva además de la desviación de ésta. En un reactor de flujo pistón efectivo, la curva *RTD* es muy similar a una normal o distribución Gausiana. Una desviación a la izquierda mostrará que  $t_{50} / t_m$  es menor que 1.0 y para el diseño esto es indeseable.

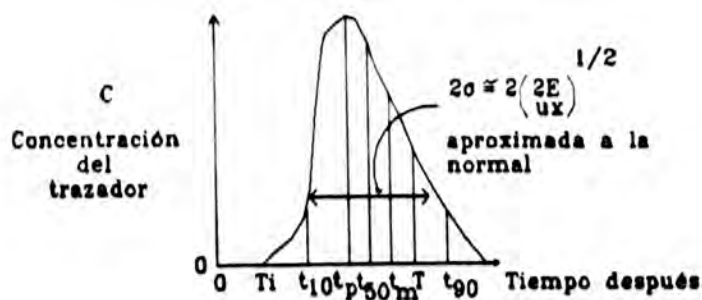


Fig. 8 Curva típica de la distribución del tiempo de residencia

Kreft, Peter., Scheible, O. Karl y Venosa, Albert. "Hydraulic studies and cleaning evaluations of ultraviolet disinfections units" J. Water Pollution Control Fed., Vol 58, No. 12. pp 1129-1137. 1986.

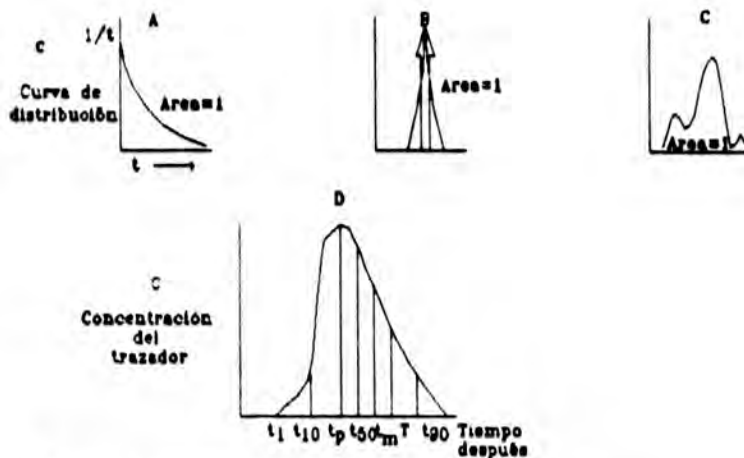


Fig. 9 Ejemplos de curvas para varios flujos:  
 A) Mezclado completo B) Pistón C) Arbitrario  
 D) Respuesta hipotética

Water Disinfection. "Ultraviolet Light Disinfection of Wastewater". Manual of Practice FD-10, WPCF, 1986

#### 2.4.2.4 Características dispersivas

Un parámetro muy usual en el diseño del reactor es el número de dispersión,  $D$ :

$$D = \frac{E}{uX} \quad \text{Ec. 2.12}$$

donde:

$E$  = coeficiente de dispersión,  $cm^2/s$

$u$  = velocidad del fluido,  $cm/s$

$x$  = dimensión del reactor en la dirección del flujo,  $cm$

Las propiedades dispersivas de un reactor se caracterizan por la amplitud relativa de la curva RTD. El valor de  $E$  aumentará en sistemas completamente mezclados, mientras que en sistemas de flujo pistón éste será nulo. Se sugieren los números de dispersión para un reactor de flujo pistón con grados de incremento de dispersión: cuando  $d = 0$  significa flujo pistón y no hay dispersión; cuando  $d \leq 0.01$ , ocurre una pequeña dispersión; cuando  $d$  está entre  $0.01$  y  $0.1$ , hay una dispersión moderada o intermedia; y cuando  $d > 0.1$ , existe una alta dispersión (*Levenspiel, 1972*).

En casos donde la curva RTD es una distribución normal (*Gaussiana*), el número de dispersión puede ser estimado desde la varianza:

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{\bar{t}_R^2} = 2 \left( \frac{E}{uX} \right) \quad \text{Ec. 2.13}$$

La varianza,  $\sigma_{\theta}^2$ , normalizada al tiempo de residencia medio, es dimensional.



### 2.4.2.5 Modelos para flujos no ideales

Los modelos usados para caracterizar flujos no ideales se les denominan *modelos de dispersión*. Pueden ser estudiados en serie o en cadenas de mezcladores ideales algunos modelos son útiles para explicar la desviación de sistemas reales tales como dispositivos tubulares o lechos empacados con características de flujo pistón mientras que otros estudian la desviación de tanques reales agitados así como lechos fluidizados y con equipos de contacto. Los modelos varían en complejidad (*Levenspiel, 1972*).

En un fluido con características de flujo pistón donde existe algún grado de mezclado o intermezclado, la características del transporte son independientes de la posición dentro del sistema. A esto se le denomina *modelo de flujo pistón disperso* o simplemente el *modelo de dispersión*. La variación en la intensidad de la turbulencia o intermezclado predice si un sistema presenta el comportamiento de flujo pistón o el de flujo mezclado.

Una difusión molecular en la dirección  $x$  se rige mediante la ecuación dada por la *Ley de Fick*:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{Ec. 2.14}$$

Donde  $D$ , coeficiente de difusión molecular, es el parámetro que caracteriza únicamente el proceso. De manera análoga podemos considerar todas las direcciones para un mezclado del fluido en la dirección  $x$  descrita mediante la siguiente expresión:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{Ec. 2.15}$$

Donde el parámetro  $D$ , el cual puede ser denominado *coeficiente de dispersión axial o longitudinal*, únicamente caracteriza el grado de mezclado durante el flujo. El término longitudinal y axial distinguen la dirección del flujo en el mezclado (lateral o radial

respectivamente). En forma adimensional, el gradiente de velocidad  $z$  está dado por  $z = (ut + x)/L$  y  $\theta = v/tm = tu/L$ , la ecuación diferencial que representa este modelo es:

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = \left( \frac{D}{uL} \right) \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\partial C}{\partial z} \quad \text{Ec. 2.16}$$

Donde el grupo adimensional  $(D/uL)$ , llamado *número de dispersión* es el parámetro que mide la dispersión axial.

**a) Dispersiones pequeñas**

Para dispersiones pequeñas la abertura en la curva de trazado no cambia significativamente en cuanto a forma. Bajo esas condiciones la curva es simétrica y está dada por la siguiente expresión:

$$C_{\theta} = \frac{1}{2\sqrt{\pi(D/uL)}} \exp \left[ -\frac{(1-\theta)^2}{4(D/uL)} \right] \quad \text{Ec. 2.17}$$

la cual tiende hacia una forma gaussiana o normal con media y variancia:

$$\theta_c = \frac{tm_c}{tm} = 1 \quad \text{Ec. 2.18}$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{tm^2} = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) \quad \text{Ec. 2.19}$$

6

$$\sigma^2 = 2 \left( \frac{DL}{u^3} \right) \quad \text{Ec. 2.20}$$

**b) Dispersiones grandes**

Cuando la curva del trazado cambia la forma significativamente, ésta es asimétrica con una extremidad un poco extendida. En esta situación las condiciones de flujo en el punto de inyección y medición influenciará la forma de la curva obtenida. Se pueden considerar dos casos: *sistemas cerrados y sistemas abiertos.*

Para sistemas cerrados podemos tener la siguiente ecuación:

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{tm^2} = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) - 2 \left( \frac{D}{uL} \right)^2 (1 - e^{-uL/D}) \quad \text{Ec. 2.21}$$

Mientras que para sistemas abiertos se tiene:

$$C_{\theta} = \frac{1}{2\sqrt{\pi\theta} (D/uL)} \exp \left[ -\frac{(1-\theta)^2}{4\theta (D/uL)} \right] \quad \text{Ec. 2.22}$$

con media y varianza:

$$\theta_c = \frac{tm_c}{tm} = 1 + 2 \frac{D}{uL} \quad \text{Ec. 2.23}$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{cm^2} = 2 \left( \frac{D}{UL} \right) - 8 \left( \frac{D}{UL} \right)^2 \quad \text{Ec. 2.24}$$

La obtención de estas expresiones así como las curvas se dan en la literatura (*Levenspiel, 1972*).

### 2.4.3 Turbulencia

Otra consideración importante en el diseño hidráulico de un reactor UV es la turbulencia del fluido. Es importante debido a que el campo de intensidad en el reactor no es uniforme. Por lo que, si una partícula es inducida a moverse radicalmente por las condiciones de turbulencia se originará que los niveles de intensidad lleguen con mayor facilidad a todo el campo no uniforme. En este caso, es conveniente usar la intensidad promedio en el reactor para evaluar los niveles de dosis que reciben los microorganismos.

Si existen condiciones de flujo laminar, las partículas podrán moverse a través de las áreas de baja intensidad a dosis relativamente pequeñas. Si se grafica el *log* de la pérdida de carga contra el *log* de la velocidad, se encontrará que existen dos regiones. Donde la velocidad es suficientemente baja para asegurar que el flujo laminar se dé, la pérdida de carga  $h_L$ , originada por fricción será directamente proporcional a la velocidad,  $u$ :

$$h_L = u^n \quad \text{Ec. 2.25}$$

$n = 1.0$  (laminar)

Como la velocidad aumenta en algunos puntos la turbulencia es inducida y  $h_L$  aumentará a proporciones muy altas con respecto al incremento de velocidad. En tubos uniformes el valor de  $n$  será  $> 1.0$ ; por lo tanto:

$$h_L = u^n \quad \text{Ec. 2.26}$$

$n = 1.75$  a  $2.0$  (turbulento)

La velocidad no es un factor que determina si un flujo es laminar o turbulento. Otro criterio que se debe considerar es el *número de Reynolds (Re)*, (*Water Disinfection, 1986*). Éste es adimensional y representa el valor de las fuerzas de inercia con respecto a las fuerzas de fricción en un ducto completamente lleno y se define mediante la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{x^2 \mu^2 \rho}{x u \mu} = \frac{L u}{\nu} \quad \text{Ec. 2.27}$$

Donde:

$\rho$  = densidad del fluido,  $kg/m^3$

$u$  = velocidad del fluido,  $m/s$

$L$  = dimensión lineal con respecto al patrón de flujo,  $m$

$\nu$  = viscosidad cinemática

$\mu$  = viscosidad dinámica

Típicamente la transición de flujo laminar a flujo turbulento ocurre a un número de Reynolds por arriba de 4000; las condiciones laminares generalmente se dan a valores menores de 2000. La dimensión lineal,  $L$ , para ductos está dada por el diámetro. En arreglos de cuarzo sumergido, ésta no está claramente definida. Una aproximación de los radios hidráulicos puede utilizarse en el análisis para estimar un número de Reynolds:

$$R_N = \frac{V_v}{A_w} \quad \text{Ec. 2.28}$$

Donde:

$V_v$  = volumen ocupado dentro del reactor,  $cm^3$

$A_w$  = área de superficie total,  $cm^2$

El volumen a ser utilizado es el volumen total del reactor menos el volumen ocupado por las lámparas y chaquetas de cuarzo.

Para un flujo que se transporta circularmente, el radio hidráulico es igual a un cuarto del diámetro de conducción. De este modo para las dimensiones lineales del reactor de la ecuación 2.27 obtenemos la siguiente expresión:

$$L = 4R_H \quad \text{Ec. 2.29}$$

El número de Reynolds puede ser estimado para el reactor con la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{4R_H U}{\nu} \quad \text{Ec. 2.30}$$

El diseño del reactor debe ser llevado a un número de Reynolds mayor que 6000 a un flujo mínimo. De ser posible, la velocidad de transición del flujo laminar/turbulento debe ser confirmado por la medición directa de la pérdida de carga sobre la batería de la lámpara.

#### 2.4.4 Volumen efectivo

El volumen de las baterías de lámparas UV ocupa una porción del sistema total. Por lo que es muy importante que el reactor esté diseñado para usar un volumen real. Las zonas muertas o áreas de corto circuito ocasionan un desaprovechamiento de las lámparas y de la energía, componentes que se consideran importantes en los costos de operación y capital. El uso máximo del volumen del reactor estará dado por las condiciones de entrada y salida del fluido. El reactor debe ser diseñado de tal forma que el fluido entre perpendicularmente a la batería de las lámparas con igual velocidad en todos los puntos.

#### 2.4.5 Intensidad ultravioleta

A un tiempo de residencia dado (exposición), el valor al cual los microorganismos pueden ser inactivados se describe como una función de la intensidad UV en el reactor. Ésta es una función de la fuente UV (salida), del arreglo físico (arreglo de las lámparas y ubicación dentro o fuera

del líquido) y de la energía presente, la cual disminuye a la salida. Su medición en algún punto dentro del reactor con arreglos complejos de lámparas no se lleva a cabo directamente por su complicada configuración. Por lo tanto, se tiene que estimar mediante algún programa computacional o por derivación implícita de procedimientos experimentales. Las diferentes configuraciones de las lámparas producirán intensidades nominales diferentes en el reactor. La densidad UV,  $D$ , está definida como la energía UV nominal total (a 253.7 nm) disponible en un reactor dividido por el volumen del líquido del reactor:

$$D = \frac{\text{salida total UV}}{\text{volumen del líquido}} \quad \text{Ec. 2.31}$$

$D$  = densidad UV, W/l

## 2.4.6 Variables de procesos que afectan la eficiencia de desinfección

### 2.4.6.1 Absorción UV

Esto puede ser descrito como la demanda UV del agua a tratar. Existen diferentes constituyentes en el agua residual los cuales afectan el valor de absorción de la energía ultravioleta que pasa a través del agua residual en la cámara de desinfección. Ésta es también absorbida en el reactor cuando pasa a través de las chaquetas de cuarzo y teflón así como por las paredes del reactor. Durante un estudio (White, 1992), se encontró que el coeficiente de absorción varía en un rango de 0.052 a 0.722, con un factor de 14, dependiendo del efluente. El coeficiente de absorción se calcula para cada observación mediante la siguiente ecuación:

$$I / I_0 = e^{-k_a L} \quad \text{Ec. 2.32}$$

Donde:

$I$  = intensidad de radiación en el fondo de la cámara de desinfección

$I_0$  = intensidad de radiación inicial

$K_a$  = coeficiente de absorción

$L$  = distancia entre puntos de medición de  $I$  y  $I_0$

$e$  = base log natural

### 2.4.6.2 Calidad del agua residual

Para la eficiencia del diseño de un reactor ultravioleta se deben considerar 3 características importantes: *la hidráulica, la intensidad del reactor y la calidad del agua residual a ser tratada*. De las tres, la calidad del agua es una variable fija que condiciona los requerimientos.

Los cuatro parámetros de agua residual que más afectan el diseño de un sistema son *el flujo, la densidad bacteriana inicial, los sólidos suspendidos (o algunas mediciones de partículas en agua residual) y la absorbancia UV del agua residual*. Otras consideraciones incluyen los requerimientos de monitoreo y muestreo así como los efectos de fotorreactivación.

### 2.4.6.3 Flujo

El flujo está en función del diseño y de la carga hidráulica de la planta. Para evaluar los requerimientos en los procesos de desinfección, se debe tener en consideración los efectos de igualación del proceso de tratamiento antes de la desinfección. Esto puede afectar el tamaño del sistema UV. Si el sistema es construido con un número de módulos paralelos, el flujo en cada módulo debe ser directamente medido. Esto asegurará una distribución balanceada entre los módulos y evitará la sobrecarga hidráulica en un módulo individual. En algunos casos se considera apropiado el control automático de la operación de los bancos de lámparas con módulos individuales para tiempos reales al flujo real. Por lo tanto, el flujo medido debe ser una parte integral de la configuración del sistema.

### 2.4.6.4 Densidad inicial

El desarrollo de un sistema de desinfección UV está directamente relacionado con la densidad inicial de los organismos indicadores. Este no es un parámetro que sea monitoreado en una planta de tratamiento, particularmente donde la desinfección está acompañada por ozonación o cloración. El desarrollo está dado por el log del valor de sobrevivencia,  $N/N_0$ , o por el número de logs la densidad es reducida. Las densidades iniciales esperadas no pueden ser predichas solamente por el tipo de proceso de tratamiento precedido al proceso de desinfección. Es recomendable que esos datos sean generados antes del diseño; los efluentes pueden ser analizados



de plantas similares en el área.

#### 2.4.6.5 Sólidos suspendidos (SS)

La obstrucción de bacterias por las partículas tiene un efecto significativo sobre el diseño de un sistema. Se recomienda que la medición de los sólidos suspendidos se utilice como indicador primario para cuantificar esas partículas. El rango de las concentraciones de los sólidos suspendidos debe ser considerado en los procesos *UV*.

#### 2.4.6.6 Absorbancia UV

Un parámetro que está en el control del proceso de desinfección es la demanda *UV* del agua residual. Cuando una lámpara emite radiación, la intensidad disminuye conforme la distancia de la lámpara aumenta; esto es causado por la disipación o dilución de la energía conforme el volumen sea ocupado. En un segundo mecanismo de disminución, la energía es absorbida por constituyentes químicos contenidos en el agua residual. Ésto, análogo a la demanda de cloro, es conocido como la "*demanda UV*" del agua residual; la energía suficiente que debe estar disponible para llevar a cabo la actividad germicida deseada.

Los compuestos orgánicos e inorgánicos específicos en el agua residual absorberán energía a  $253.7 \text{ nm}$  de longitud de onda. Esto afecta la intensidad de la radiación en el reactor; en situaciones de diseño específico, el nivel de absorbancia afectará el tamaño de un sistema y la posibilidad de configuración de las lámparas.

La transmitancia del agua residual se utiliza comúnmente para describir la demanda del agua residual. Esto puede ser determinado por la medición de la absorbancia y muy frecuentemente expresada sobre una base porcentual:

$$\% \text{ Transmitancia} = 100 \cdot 10^{-a.u. / \text{cm}} \quad \text{Ec. 2.33}$$

Donde:

*a.u.* = unidades de absorbancia

El porcentaje absorbido se determina con la diferencia del 100% menos el porcentaje de transmitancia. El parámetro comúnmente usado para propósitos de diseño es el coeficiente de absorbancia UV,  $a_u$ , expresado en base  $e$ :

$$a_u = 2.3 (a.u./cm) \quad \text{Ec. 2.34}$$

La unidad del coeficiente de absorbancia UV es  $cm^{-1}$ .

#### 2.4.7 Consideraciones de mantenimiento en un reactor UV

Un factor importante en el mantenimiento de un reactor UV para lograr un desarrollo efectivo es mantener todas las superficies tan limpias como sea posible a través de las cuales la radiación debe pasar. Si la superficie se ensucia resulta crítico ya que esto influye en el comportamiento de un sistema en particular.

##### 2.4.7.1 Mantenimiento del reactor

###### 2.4.7.1.1 Monitoreo de reactores

El método más confiable para determinar si un reactor se está ensuciando y requiere limpieza, es a través de una inspección visual. La unidad debe ser drenada y observar las superficies sucias. En sistemas abiertos esto puede hacerse rápida y frecuentemente mientras que en reactores sellados esta operación se dificulta. Generalmente las superficies de sistemas de cuarzo que entran en contacto con el agua residual, tienden a cubrirse con sustancias inorgánicas. Esto sucederá en lugares donde el agua es muy dura. Además, los lados de las superficies de cuarzo y de las superficies externas de los tubos de teflón eventualmente formarán una capa de polvo deforme, principalmente de vapor de agua. La suciedad de las superficies de los reactores da como resultado una reducción en la eficiencia del sistema por lo que sería una señal que el equipo requiere mantenimiento.

#### **2.4.7.2 Sistemas de revisión**

Al menos una vez por año el reactor debe ser revisado completamente, todas las superficies interiores deben ser limpiadas y determinar el estado de las lámparas, así como del cuarzo mediante la transmitancia. Cada lámpara debe ser removida del reactor y lavada con una solución de jabón blando, enjuagada y limpiada con un trapo empapado de alcohol (isopropílico). El interior de las superficies de las chaquetas de cuarzo se deben limpiar mediante el mismo mecanismo.

#### **2.4.7.3 Limpieza en el lugar de rutina**

Es importante que cuando se realice la limpieza mediante algún químico y/o detergente, se mantengan aisladas todas las superficies de cuarzo y de teflón. Esto es particularmente cuando el agua residual esté demasiado sucia (de efluentes primarios y secundarios), ya que tienen un alto contenido de aceite y grasa o un alto contenido de dureza. Las superficies de cuarzo sucias (y a menor grado las superficies de teflón) se deben al contenido de magnesio inorgánico y a los carbonatos de calcio. El depósito de material inorgánico es de fácil control; la acidificación simple del agua del reactor generalmente disuelve el material y restaura la superficie. En el caso de un alto contenido de grasa es necesario usar un detergente o alguna combinación de agentes de limpieza. Esto comúnmente se determina por prueba y error para una situación en particular. La frecuencia con la cual esta labor de limpieza debe realizarse se determinará con base en la experiencia.

Diferentes proveedores ofrecen accesorios que mantienen limpias las superficies de teflón o cuarzo. Generalmente, son rodillos mecánicos, ultrasónicos y boquillas de alta presión. Los primeros y los segundos pueden ser aplicados a sistemas de cuarzo mientras que el lavado mediante *spray* de alta presión es aplicable tanto a sistemas de cuarzo como a los de teflón.

#### **2.4.8 Consideraciones de seguridad**

La desinfección ultravioleta es un proceso seguro. La radiación UV es generada en el sitio, por lo que no hay problema en cuanto al transporte o con respecto al almacenamiento de material

reactivo. Las aplicaciones de seguridad en una planta normal se refieren a riesgos físicos y a peligros eléctricos de los altos voltajes, por lo que se debe tener una atención particular a los cables eléctricos, subterráneos y externos.

El almacenamiento, manejo y disposición de los componentes de un sistema de desinfección por luz UV son de suma importancia. Por ejemplo las lámparas, las chaquetas de cuarzo y las balastras deben almacenarse por separado en un área seca. Una vez usadas deben ser descartadas, reempacadas y colocadas en un lugar seguro.

Se debe tener una seguridad estricta para el personal con respecto a la radiación excesiva de UV. Una batería de lámparas no debe presentar riesgo mientras esté sumergida y en operación. La protección de los operadores debe incluir *goggles* de plástico o mascarillas probadas para absorber líneas espectrales UV. La ropa debe ser evaluada para prevenir la exposición de las manos, brazos y cara ya que la piel y los ojos absorben radiación UV la cual es perjudicial en esas zonas.

### CAPÍTULO 3

#### COSTOS DE PROCESOS DE DESINFECCIÓN

---

En el presente capítulo se describen las bases teóricas de estimación de costos, utilizando información de literatura (WERF, 1995), ya que en México no se cuenta con experiencia suficiente para determinar los parámetros de capital así como de operación y mantenimiento (O & M) que rigen un proceso de factibilidad. Para el caso se consideran dos medios alternativos de desinfección: radiación ultravioleta y cloración/decloración para efluentes secundarios.

#### 3 Costos de procesos de desinfección

Suponiendo que los efluentes secundarios teóricos evaluados (reportado en la literatura) se asemejan a los utilizados en este trabajo. Los criterios seleccionados para la estimación de costos anualizados totales, de capital y de operación y mantenimiento tanto para sistemas de desinfección UV y cloración/decloración se presentan en primer término, seguidos por una comparación y discusión teórica de costos estimados.

#### 3.1 Criterios para la estimación de costos

Los costos de capital y de O & M para sistemas de radiación UV y cloración/decloración se estimaron con base en las siguientes consideraciones:

- Los costos se consideraron tomando en cuenta a las compañías que emplean la desinfección para efluentes secundarios con diferentes flujos promedio de 0.044, 0.438 y 4.381 m<sup>3</sup>/s.
- Todos los costos unitarios son considerados de acuerdo al reconocimiento y planeación de la *American Association of Cost Engineers*.
- Los costos estimados se basan sobre diseño y construcción de nuevas compañías de desinfección.
- Los costos de cloración/decloración se basan en el art. 80 del Código Federal 1991 (WERF, 1995), el cual considera sistemas de tratamiento de gas cloro y bióxido de cloro así como la energía suficiente para operar el equipo de tratamiento químico.
- Los costos totales involucran costos de capital y O & M anualizados a 20 años al 8% de interés.

### 3.2 Índice de costos

Para conocer el índice de costos es importante considerar algunos factores que proporcionen valores reales y puedan ser útiles en aplicaciones. Recurriendo a la literatura, se encontró que en Estados Unidos (WERF, 1995), se llevó a cabo un estudio en el cual los costos de capital y O & M se ajustaron mensualmente en 1993 para un promedio de 20 ciudades obteniendo así un factor para diferentes costos, dicho valor fue obtenido por *Engineering News Record Construction Cost (ENRCC)* y es de 5,210.

### 3.3 Ajuste de costos

Los datos de costos reportados en la literatura pueden ser ajustados usando la siguiente relación:

$$\text{Costo actual} = \frac{5,210}{\text{índice reportado por ENRCC}} \cdot \text{Costo reportado}$$

Los costos pueden ser proyectados a futuro como sigue:

$$\text{Costo a futuro} = \frac{\text{índice proyectado a futuro por ENRCC}}{5,210} \cdot \text{Costo citado en este reporte}$$

### 3.4 Costos para sistemas de desinfección UV

#### 3.4.1 Costos de capital para sistemas de desinfección UV

Los costos de capital para sistemas de desinfección UV se resumen en la *tabla 3.1* y se basan en resultados recientes, estimados de ingeniería, información de fabricantes y precios de materiales.

Tabla 3.1 Costos de capital para sistemas de desinfección UV

Artículo	Unidad	Valor*	
		Intervalo	Típico
<b>Lámparas UV</b>			
0.044 - 0.219 m <sup>3</sup> /s	\$/lámpara UV	397 - 1365	575
0.219 - 0.438 m <sup>3</sup> /s	\$/lámpara UV	343 - 594	475
0.438 - 4.381m <sup>3</sup> /s	\$/lámpara UV	274 - 588	400
> 4.381m <sup>3</sup> /s	\$/lámpara UV		375
Costos de construcción para compañías físicas	% de costo por lámpara UV	75 - 200	150

\* Basado sobre el índice de ENRCC de 5,210

Fuente: WERF, 1995

### 3.4.2 Costos de O & M para sistemas de desinfección UV

Los costos de O & M para desinfección UV incluyen el consumo de la energía eléctrica, reemplazamiento de lámparas, de balastras, de chaquetas, así como de químicos de limpieza, requerimientos de personal, suministros así como reparación de equipo, ver *tabla 3.2*. Además se consideran los siguientes criterios:

- El tamaño de los sistemas con base en las plantas de tratamiento según literatura (*WERF, 1995*). Los factores usados se encuentran en el intervalo de 7.666 a 0.099 m<sup>3</sup>/s, dependiendo del tamaño de la planta.
- Consumo de energía (lámpara y balastra) es igual a 85W/lámpara (intervalo 70-85W/lámpara).
- Reemplazamiento de la lámpara con base en 12,000 horas de uso (intervalo 8,760 - 14,000 h).
- Reemplazamiento de la balastra sobre 10 años (intervalo de 10 - 15 años).
- Reemplazamiento de chaquetas de cuarzo sobre 5 años (intervalo de 5 - 8 años).
- Limpieza química por 4 meses.
- Requerimientos de estancia para sistemas grandes ( $\geq 0.438$  m<sup>3</sup>/s) son 30 min por lámpara por año. Para sistemas pequeños (0.044 - 0.219 m<sup>3</sup>/s), usa 45 min por lámpara por año.
- Costos de reparación de equipos basados sobre un valor de 2.5% del costo de equipo total.

Tabla 3.2 Costos de O &amp; M para sistemas de desinfección UV

Artículo	Unidad	Costo unitario \$	Costo por año \$/lámpara*
1. Energía eléctrica	kW.h	0.08	29.78
2. Reemplazamiento de lámpara	Cada una	40.00	14.60
3. Reemplazamiento de balastras	Cada una	80.00	4.00
4. Reemplazamiento de chaquetas	Cada una	40.00	4.00
5. Químicos, etc	Lámpara/año	5.00	5.00
6. Estancia	Por hora	36.00	18.00 - 27.00
7. Reparación de equipo			10.00 - 14.38
<b>Total</b>			<b>85.38 - 98.76</b>

\* Basado sobre el índice de ENRCC de 5,210

Fuente: WERF, 1995

### 3.5 Costos para sistemas de desinfección de cloración/decloración

#### 3.5.1 Costos de capital para sistemas de cloración/decloración

Los costos unitarios para los componentes incorporados en los sistemas de cloración/decloración corresponden a flujos promedio de 0.044, 0.438 y 4.381 m<sup>3</sup>/s. Los datos se dan para tres dosis de cloro diferentes (5, 10 y 20 mg/l) y se obtuvieron de estimaciones de *Wallace and Tiernan y de Fischer and Porter (WERF, 1995)*. Para lavadores y demás equipo se obtuvieron de estimados de *RJ Environmental and Powel Fabrication (WERF, 1995)*. Las cuotas de los fabricantes se hicieron con base en un factor de 2.1 considerando la instalación, los gastos laborales e impuestos. Otro adicional de 1.2 se aplicó a todos los costos de capital para la ingeniería y administración durante el diseño e instalación de los sistemas. Esos valores dieron como resultado un factor de 150% de costos de equipo, el mismo que se empleó durante la estimación para sistemas UV ( $2.1 \times 1.2 = 2.5$ , o 150% de equipo + costos de equipo = 22.5 x costos de equipo), ver tabla 3.3.



Tabla 3.3 Costos unitarios para sistemas de cloración/decloración para diferentes flujos promedios de 0.044, 0.438 y 4.381 m<sup>3</sup>/s

Artículo	Unidad	Costo unitario, 1,000 dólares								
		0.044 m <sup>3</sup> /s			0.438 m <sup>3</sup> /s			0.438 m <sup>3</sup> /s		
		Dosis de cloro (mg/l)								
		5	10	20	5	10	20	5	10	20
Construcción de almacenador de cloro (no evaporadores)	1 m <sup>2</sup>	1.94	1.94	1.94	2.15	III	III	III	III	III
Construcción de almacenador de cloro	1 m <sup>2</sup>	III	III	III	III	2.37	2.37	2.37	1.72	1.72
Construcción de almacenador de bióxido de azufre	1 m <sup>2</sup>	1.94	1.94	1.94	2.15	2.37	2.37	2.37	1.72	1.72
Separador Cl <sub>2</sub> /SO <sub>2</sub> 1-ton	Cada uno	189	189	189	189	189	189	III	III	III
Separador Cl <sub>2</sub> /SO <sub>2</sub> 25-ton	Cada uno	III	III	III	III	III	III	588	588	588
Equipo de descarga carro tanque RR	III	III	III	III	III	III	III	III	103	103
Tracks RR	1 m	III	III	III	III	III	III	III	0.33	0.33
Torres de descarga	Cada uno	III	III	III	III	III	III	III	150	150
Escala	Cada uno	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	III	III	III
Sistema de switch automático	Cada uno	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	III	III	III
Tanque de almacenamiento y accesorios	Cada uno	III	III	III	III	III	III	25	III	III
Evaporadores de cloro	Cada uno	III	III	III	27.3	27.3	27.3	29	27.3	27.3
Evaporadores de bióxido de azufre	Cada uno	III	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3	29	27.3	27.3
Cuarto de alimentación del gas (a vacío)	1 m <sup>2</sup>	1.94	1.94	1.94	2.15	2.37	2.37	2.15	1.72	1.72
Cloradores y sulfonadores	Cada uno	19	19	19	19	19	19	19	24.7	24.7
Tubos de vacío para inyectar (Cl <sub>2</sub> y SO <sub>2</sub> )	23	30	38	45	75	95	120	150	180	
Inyectores remotos de Cl <sub>2</sub> y SO <sub>2</sub>	Cada uno	26.3	26.3	26.3	26.3	26.3	26.3	42	42	42
Sistema de medición de flujo	Cada uno	15	15	15	75	75	75	250	250	250
Sistema de control Cl <sub>2</sub> y SO <sub>2</sub>	Cada uno	10	10	10	20	20	20	50	50	50
Sistemas de muestreo del residual	Cada uno	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6
Bases de contacto de cloro	1 m <sup>3</sup> /s	2727	2727	2727	2727	2727	2727	2045	2045	204
Generador de energía de emergencia	Unidad	50	50	50	75	75	75	200	200	200

III Equipo no requerido

Fuente: WERF. "Comparison of UV irradiation to chlorination: Guidance for Achieving Optimal UV Performance. Disinfection". Water Environment Research Foundation. 1995

### 3.5.2 Costos de O & M para sistemas de cloración/decloración

El estimado de costos de O & M para sistemas de cloración/decloración siguen un procedimiento similar al de los sistemas de desinfección UV. Para este análisis teórico, se consideran los costos de químicos (cloro y bióxido de cloro), laborales y de mantenimiento. Los costos unitarios estimados asociados con cada uno de esos componentes se dan en la *tabla 3.4*. Las cuotas para cloro y bióxido de azufre se obtienen considerando la obtención de químicos. Estos costos químicos se determinan considerando que se producen en el sitio.

Tabla 3.4 Costos de O & M para sistemas de desinfección de cloración/decloración

Artículos para costo	Unidad	Costo (\$)
<b>Cloro líquido</b>		
Contenedores ton	1 ton	550.00
Volumen	1 ton	450.00
Carro tanque	1 ton	200.00
<b>Bióxido de azufre líquido</b>		
Contenedores ton	1 ton	550.00
Volumen	1 ton	320.00
Carro tanque	1 ton	250.00
<b>Mano de obra</b>		
Analizador residual	1h/unidad.d	36.00/h
Limpieza de tanques $\leq 0.876 \text{ m}^3/\text{s}$	15h/(0.044 $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{año}$ )	36.00/h
Limpieza de tanques $> 0.876 \text{ m}^3/\text{s}$	6h/(0.044 $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{año}$ )	36.00/h
Producción de contenedores ton	0.5h/producción	36.00/h
Producción de químicos en volumen	2h/producción	36.00/h
Producción de carro tanque	8h/producción	36.00/h
Reparación de equipo y remplazamiento	5.0% de costos de equipo	

Fuente: WERF. *"Comparison of UV irradiation to chlorination: Guidance for Achieving Optimal UV Performance. Disinfection"*. Water Environment Research Foundation. Project 91-WWD-1. 1995

### 3.6 Comparación de costos UV y cloración/decloración

Para radiación ultravioleta y cloración/decloración se comparan en la *tabla 3.5*. Solamente se presenta el rango de costos anualizados totales.

**Tabla 3.5 Comparación de costos anualizados totales para sistemas de desinfección por radiación ultravioleta y cloración/decloración.**

Valor de flujo (m <sup>3</sup> /s)	Rango en costos anualizados totales (\$1000)*	
	Radiación UV	Cloración/decloración
0.044	19.6 - 106	164 - 206
0.438	153 - 827	478 - 781
4.381	1,132 - 6228	2120 - 2820

\* Los costos están a un nivel de planeación y reconocimiento estimado con un +50/-30% del rango de variabilidad de acuerdo con la *American Association of Cost Engineers*.

Fuente: WERF. *"Comparison of UV irradiation to chlorination: Guidance for Achieving Optimal UV Performance. Disinfection"*. Water Environment Research Foundation. Project 91-WWD-1. 1995

Basados sobre los criterios aplicados anteriormente, la tabla anterior indica que la radiación ultravioleta ofrece significantes ventajas en cuanto a costos con respecto a la cloración/decloración.

### 3.7 Resumen de la comparación de costos

Con base a los resultados teóricos presentados en la *tabla 3.5* se puede apreciar que existe un gran margen en los costos para UV, para un flujo en particular, el cual está influenciado por el diseño específico (por ejemplo, límite de coliformes del efluente y la calidad del agua). El rango indica que la radiación UV es menos cara que para la cloración/decloración, excepto cuando los criterios de descarga deben ser muy estrictos. En esta comparación es importante tener en cuenta lo siguiente:

- La estimación realizada para sistemas de desinfección UV se basan en configuraciones de procesos disponibles por fabricantes de equipo. Aunque algunos diseños resultan con más lámparas, las cantidades consideradas se evalúan estadísticamente mediante un modelo empírico de la WERF. La selección del mejor método o combinación de métodos, consideró el número más bajo del total de lámparas.
- El diseño utilizado para sistemas de desinfección UV fue diferente con respecto al usado para cloración/decloración.
- Para cloración/decloración fueron determinados suponiendo 30 minutos de tiempo de contacto. Sin embargo, puede haber casos específicos en los cuales los ductos de salida del

efluente se usen para el contacto de cloro. El costo de un contactor por separado puede presentar aproximadamente el 75% del capital total para sistemas muy grandes.

La tabla 3.6 muestra una comparación proyectada de costos de operación y mantenimiento de alternativas de desinfección para el año 2000, de una Planta de tratamiento de agua residual, localizada en Waldwick, N.J. (Fahey, 1990).

Tabla 3.6 Comparación de costos estimados de O & M anuales para el año 2000. Northwest Bergen County

Alternativas	1	2	3	4	5	6
Química	\$ 63,000	\$ 66,000	\$ 81,000	\$ 85,000	\$ 3,000	----
Mano de obra	19,000	19,000	19,000	19,000	5,000	5,000
Energía	12,000	12,000	12,000	12,000	28,000	147,000
Mtto. general	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	29,000*
TCPA**	10,000	10,000				
Costos anuales	\$107,000	\$110,000	\$115,000	\$119,000	\$65,000	\$162,000

1. Cloración gas líquido con decoloración con bióxido de azufre

2. Cloración gas líquido con decoloración de bisulfito de sodio

3. Hipocloración con decoloración de bióxido de azufre

4. Hipocloración con decoloración de bisulfito de sodio

5. Radiación ultravioleta

6. Ozonación

\* Incluye los costos de remplazamiento de lámparas UV

\*\* Costos anuales estimados asociados con la reglamentación del "Toxic Castastrophe Prevention Act"

Fuente: Fahey, Richard J. *"The UV Effect on Wastewater"*. Water/Engineering & Management, Diciembre, 1990.

La comparación teórica llevada a cabo muestra una gran ventaja de los sistemas de desinfección ultravioleta en cuanto a la operación, seguridad y efectos al ambiente y como consecuencia la posibilidad de una expansión en su uso así como llevar a cabo la conversión de sistemas convencionales a sistemas UV.

## CAPÍTULO 4

### METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

---

El Instituto de Ingeniería de la UNAM, coordinación de Ingeniería Ambiental, cuenta con un prototipo para la desinfección por medio de luz ultravioleta (UV) a nivel laboratorio, para el tratamiento de agua potable o residual, el cual emplea como fuente de radiación UV una lámpara germicida. Para llevar a cabo esta experimentación se requiere conocer primeramente las características hidráulicas del reactor. Para ello se desarrolló una curva de distribución del tiempo de residencia (RTD) empleando un mecanismo de trazado con cloruro de sodio. Éste se inyectó corriente arriba como medio trazador y al cabo de cierto tiempo se tomaron muestras y midió la conductividad a diferentes flujos. De lo anterior se obtiene el tiempo real promedio ( $t_m$ ) de exposición de la partícula dentro del reactor.

#### 4 Experimentación

La unidad de desinfección UV se probó durante dos periodos de operación continua en el laboratorio. Se evaluaron dos efluentes provenientes de tratamientos diferentes, el primero se obtuvo después de un tratamiento físico-químico de la planta piloto de Ojo de Agua y el segundo de la filtración de un tratamiento biológico de la planta de tratamiento de aguas residuales de ciudad universitaria.

Los parámetros evaluados fueron: *conductividad, temperatura, pH, turbiedad, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT) y coliformes fecales (CF)*, para ello se procedió a recolectar la muestra, en los sitios antes mencionados, en recipientes previamente lavados para llevar a cabo el tratamiento de desinfección a diferentes tiempos de exposición. La muestra desinfectada se recolectó en recipientes aislados de la luz para evitar posible efecto de reactivación de microorganismos. Se evaluó el efecto de fotorreactivación exponiendo las muestras desinfectadas directamente a la luz solar por un tiempo de 3 horas. Con los datos obtenidos del reactor UV se adaptó un modelo matemático útil para conocer la aplicación de este trabajo considerando el flujo y el tiempo de exposición real.

#### 4.1 Materiales

##### 4.1.1 Descripción de la unidad de desinfección ultravioleta

El sistema consiste de una cámara de acero inoxidable, con capacidad 18 litros (0.018 m<sup>3</sup>),

constituida por mamparas y que puede ser operado a un flujo máximo de 30 l/min (0.0005 m<sup>3</sup>/s), ver figura 10. Además, está equipada con una lámpara germicida de vapor de mercurio de baja presión con una potencia de 30 watts, colocada en la parte superior dentro de la unidad. Tanto la entrada como la salida se encuentran en el extremo final del reactor. El reactor cuenta con dos canales. El nivel del agua es regulado por unas mamparas y el volumen en el reactor aumenta paulatinamente manteniéndolo constante. La parte superior del sistema tiene una forma cóncava que permite a la luz UV ser reflejada uniformemente a través de todo el sistema. Sus dimensiones son: 119 cm de largo, 40 cm de ancho y 23 cm de alto. Las características de la unidad de desinfección UV se dan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Características de la unidad de desinfección UV.

Tipo de lámpara	Longitud de la lámpara (mm)	Volumen irradiado (litros)	Salida u.v. (W /lámpara)	Consumo de energía total ( W )
LMBP *	915	17.8	30	85

\* LMBP = Lámpara de mercurio de baja presión

El reactor UV consta de las siguientes partes:

- Una entrada por medio de un tubo que tiene orificios para la distribución del fluido así como un orificio para la inyección del trazador.
- 3 mamparas de alturas diferentes para controlar el nivel del fluido.
- Una configuración similar a la de tipo pistón.
- Una forma cóncava en la parte superior para provocar la reflexión de la luz UV.
- Una lámpara germicida UV con una salida de 30 Watts de potencia.
- Se anexa una bomba peristáltica con regulador de velocidad.

## 4.2 Procedimiento de instalación y operación del sistema UV

### 4.2.1 Instalación del sistema UV

- a) Colocar la unidad sobre una base y un nivel adecuado.
- b) Proporcionar conexiones (entrada ¾" BSP macho y salida 1½ BSP macho).
- c) Conectar la unidad a una fuente de corriente de 125 V.
- d) Conectar el cordón convertidor a un suministro de energía de corriente directa de 12 V.

#### **4.2.2 Procedimiento de operación del sistema UV**

- a) Mantener la tapadera abierta, abrir la válvula lentamente.
- b) Asegurarse de que el nivel del agua nunca se eleve por arriba de la mampara de separación y el flujo sea de 30 l/min como máximo.
- c) Permitir que el agua circule por 5 minutos y drenar el agua. Esta operación debe realizarse para eliminar polvo e impurezas.
- d) Cerrar la válvula y cerrar la tapadera.
- e) Conectar al suministro de energía.
- f) Abrir la válvula y asegurarse de que la válvula esté abierta exactamente para lograr el flujo deseado.
- g) Al cabo del tiempo de exposición seleccionado, empezar a recolectar el agua tratada.
- h) Cerrar la unidad, cerrar la válvula y desconectar la corriente.
- i) Limpiar la unidad.

#### **4.3 Desarrollo experimental**

Durante dos períodos, el primero de 5 y el segundo de un mes, se operó la unidad en forma continua en el laboratorio para la desinfección de efluentes, provenientes de los tratamientos antes mencionados. La unidad fue sometida a una limpieza manual después de haber sido utilizada.

Se conectó el reactor UV en flujo continuo, primero para su caracterización hidráulica y posteriormente para la desinfección de agua residual. Con el empleo de una bomba peristáltica provista de un regulador de velocidad, el agua se hizo pasar a través del sistema para posteriormente recibir la muestra en recipientes previamente aislados de la luz (Ver la *figura 11*).

##### **4.3.1 Caracterización hidráulica**

Para la caracterización hidráulica se utilizó cloruro de sodio (NaCl) como trazador inyectando un pulso de una solución de 500 mg/l a la entrada del sistema para cada prueba. En el efluente se midió la conductividad empleando un conductímetro.

#### **4.3.1.1 Desarrollo de la curva de distribución del tiempo de residencia**

El desarrollo de la curva de distribución del tiempo de residencia (RTD) de un reactor, generalmente se lleva a cabo como una técnica de *estímulo-respuesta*. En este caso, el *estímulo* es la inyección de un trazador no reactivo o conservativo al fluido que entra al sistema mientras que la *respuesta* es el registro al tiempo en el que sale el trazador del mismo.

Para la evaluación se consideraron el flujo de entrada y el tiempo de exposición. El flujo está en función del regulador de velocidad de la bomba peristáltica (600 rpm). Para la determinación de la curva RTD se fijaron una serie de velocidades para cada flujo y se determinaron los tiempos de exposición reales.



1. Micro switch
2. Balastra electrónica
3. Unidad de control electrónico
4. Cable para conectar a la corriente
5. Lámpara ultravioleta
6. Sensor
7. Reflector
8. Mampara
9. Entrada
10. Salida

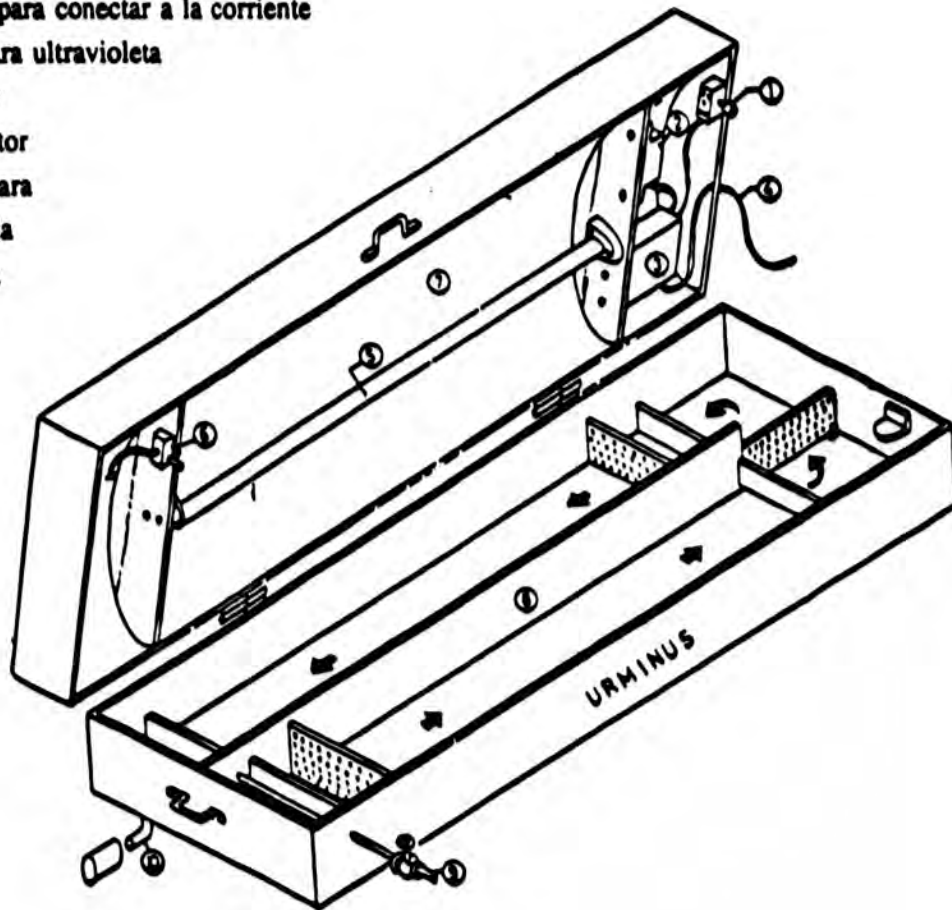


Fig. 10 Diagrama esquemático del reactor UV

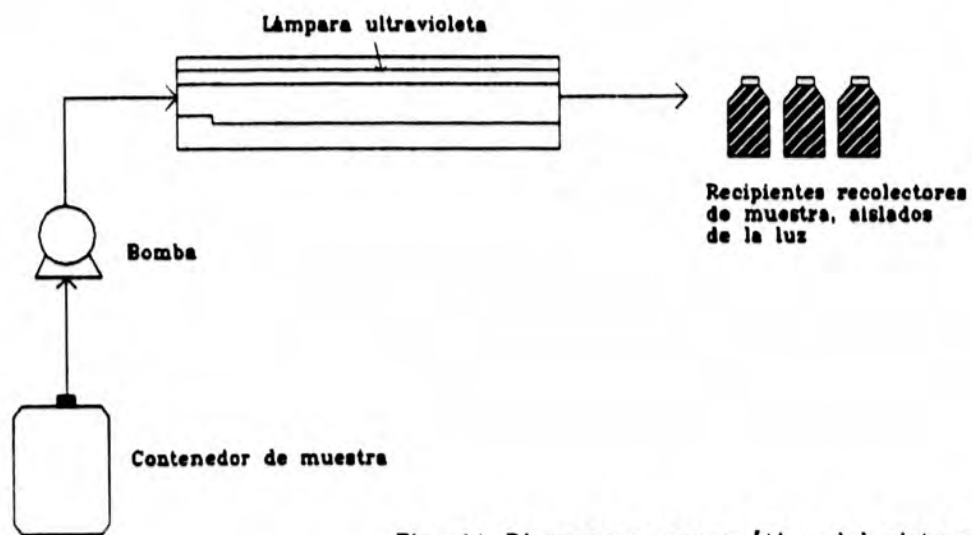


Fig. 11 Diagrama esquemático del sistema de desinfección ultravioleta

#### 4.3.1.2 Cálculo del tiempo de residencia promedio del sistema UV

El tiempo de residencia promedio ( $t_m$ ) para cada curva, el  $t_m$ , es el valor medio o el centroide de la distribución, el cual se obtuvo sumando las áreas como intervalos de tiempo discreto empleando la ecuación 2.10 del capítulo 2.

#### 4.4 Parámetros a evaluar

Para evaluar el tratamiento por luz UV se monitorearon los parámetros físico-químicos enlistados en la *tabla 4.2*. Los límites establecidos están basados de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana "NOM-CCA-032-ECOL/1993" y dependiendo de los tipos de cultivos para el análisis bacteriológico, la "NOM-CCA-033-ECOL/1993" (*Diario Oficial de la Federación, 1993*).

Tabla 4.2 Parámetros seleccionados para la desinfección UV

Parámetro	Límite máximo permisible por la Norma Oficial	Tipo de análisis
pH (unidades de pH)	6.5 - 8.5	Potenciométrico
Conductividad (micromhos/cm)	2000	Conductímetro
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	120	Gravimétrico
Sólidos disueltos totales (mg/l)	----	Gravimétrico
Coliformes fecales (UFC/100 ml)	1000	Filtro de membrana (Cuenta estándar)
Temperatura	----	Termómetro
Turbiedad	----	Turbidímetro

Fuente: Diario Oficial de la Federación, 1993

#### 4.5 Técnicas analíticas

##### 4.5.1 pH

La concentración de iones hidrógeno es medida por medio de un electrodo de vidrio, el cual desarrolla un potencial proporcional a los iones hidrógeno que penetran por su membrana, y se lleva a cabo contra un potencial estándar. Fue determinado con un potenciómetro de campo HACH modelo 43800-00. Esta medición se llevó a cabo con base en el Método 150.1 (Electrométrico) de la EPA, U.S.A. (*APHA, AWWA, WPCF, 1992*).

#### **4.5.2 Conductividad**

La conductividad eléctrica representa la capacidad de una solución para conducir la corriente eléctrica. Se determina transmitiendo una corriente eléctrica a través de la solución problema. Fue determinada utilizando un conductímetro HACH modelo 44600. Se llevó a cabo con base en el Método 120.1 (Conductancia específica) (APHA, AWWA, WPCF, 1992).

#### **4.5.3 Sólidos suspendidos totales**

Los sólidos suspendidos totales son medidos graviméricamente. Se realizó con base en el Método 160.1 (Gravimétrico, secado a 180 °C) (APHA, AWWA, WPCF, 1992).

#### **4.5.4 Sólidos disueltos totales**

Los sólidos disueltos totales son medidos graviméricamente. Se hizo con base en el Método 160.2 (Gravimétrico, secado a 103 - 105 °C) (APHA, AWWA, WPCF, 1992).

#### **4.5.5 Coliformes fecales**

La técnica se basa en pasar el agua a través de una membrana de acetato de celulosa y 0.45 micras de poro donde las bacterias presentes quedan retenidas. Posteriormente se colocan en un medio de cultivo con nutrientes que promueven el crecimiento bacteriano formando colonias con brillo metálico a una temperatura de 35 °C en  $24 \pm 2$  horas. Un supuesto es que una bacteria da lugar a la formación de una colonia, es decir a una Unidad Formadora de Colonias, que es lo que permite estimar la densidad bacteriana en un volumen de muestra determinado (APHA, AWWA, WPCF, 1992).

#### **4.5.6 Temperatura**

El mercurio depositado en el bulbo del termómetro, se encuentra sujeto a contracción o expansión debido a la mayor o menor energía del medio donde esté sumergido. Se realizó con base en el Método 170.1 (Termométrico) (APHA, AWWA, WPCF, 1992).

#### **4.5.7 Turbiedad**

En una dispersión coloidal de una sustancia con partículas en suspensión se mide la luz difundida a través de la solución comparándola con un estándar. Esta medición se llevó a cabo con en base en el Método 180.1 (Nefalométrico) (EPA, 1983).

#### **4.6 Procedencia de la muestra**

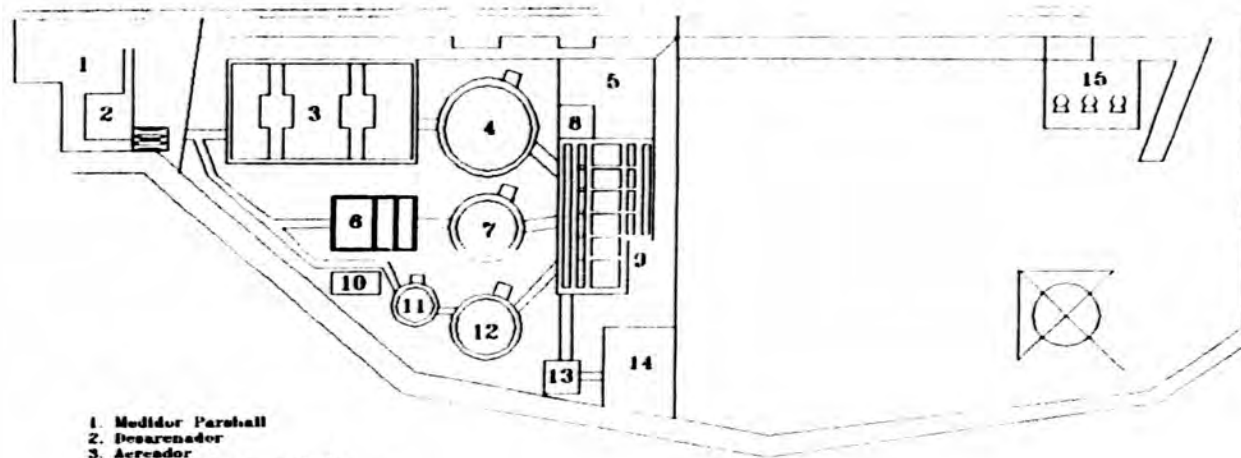
Se llevaron a cabo dos períodos de muestreo debido a los dos diferentes efluentes manejados. Las muestras se recolectaron en recipientes de 50 litros, previamente lavados y llevados al laboratorio para su análisis con base en la técnica de muestreo referenciada en la Norma Oficial Mexicana (*Diario Oficial de la Federación, 1993*). Una vez desinfectadas las muestras se recolectaron en recipientes aislados de la luz para evitar la fotorreactivación.

##### **4.6.1 Planta piloto de Ojo de Agua**

Las primeras pruebas de funcionamiento del dispositivo se realizaron con muestras de la planta piloto de Ojo de Agua que se ubica en el km 27.5 del Gran Canal en el municipio de Ecatepec de Morelos, Edo. de México. El agua cruda del Gran Canal entra a la planta previa eliminación de sólidos gruesos y está integrada por cuatro módulos. El primero es una cámara de coagulación o mezcla rápida a la cual se le adiciona sulfato de aluminio  $Al_2(SO_4)_3$ . El segundo es la cámara de floculantes o de agitación lenta a la cual se adiciona el polímero. El tercer es una unidad de manto de lodos conectada al sedimentador de alta tasa (módulo 4). Esta planta tiene capacidad de operación 161.5 m<sup>3</sup>/h y opera a un tiempo de retención hidráulico de 30 minutos. La muestras fueron tomadas del puerto de muestreo localizado después del sedimentador del tratamiento físico-químico.

##### **4.6.2 Planta de tratamiento de aguas residuales de ciudad universitaria, UNAM**

Posteriormente se tomaron muestras de la planta de tratamiento de ciudad universitaria, las cuales se recolectaron después de la filtración y de haber pasado por tres procesos de biológicos que funcionan en paralelo: *Lodos activados*, *Biofiltros (Filtro percolador)*, *Biodiscos (Discos Biológicos Rotatorios)* ver la figura 12.



1. Medidor Parshall
2. Desarenador
3. Aereador
4. Sedimentador secundario
5. Cárcamo para agua de lavado y pluviales
6. Biódisco
7. Sedimentador secundario
8. Cárcamo para la recirculación de lodos
9. Filtros
10. Cárcamo doble para la recirculación de lodos
11. Biofiltro
12. Sedimentador secundario
13. Cárcamo de aguas tratadas
14. Clorador
15. Cárcamo de aguas negras

Fig. 12 Diagrama de flujo de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Ciudad Universitaria

Fuente: Planta de tratamiento de agua residual de C.U.

## CAPÍTULO 5 RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Durante el presente trabajo se analizaron dos efluentes provenientes de diferentes tratamientos, por lo que se consideró de gran importancia caracterizar el equipo ultravioleta a diferentes flujos para obtener tiempos de exposición reales. Posteriormente se llevó a cabo la desinfección y la medición propia de los parámetros seleccionados.

### 5.0 Resultados de la caracterización hidráulica

Considerando que la cámara tiene un volumen de aproximadamente *18 litros* se procedió a realizar el trazado, inyectando aproximadamente *500 mg/l de cloruro de sodio* a la entrada del sistema como trazador, a diferentes flujos dando los resultados de la tabla 5.1:

Tabla 5.1 Resultados del tiempo de exposición real a diferentes flujos

Gasto (l/min)	Tiempo de exposición teórico (min)	Tiempo de exposición real (min)
8,44	2,11	5,098
7,89	2,26	6,863
7,21	2,47	7,35
5,20	3,42	6,50
4,67	3,81	7,61
3,75	4,75	9,15
3,38	5,27	7,24
3,08	5,79	9,57
2,59	6,88	16,67

Las características determinadas en las curvas del trazado, se presentan en la *tabla 5.2a y b*.

### 5.1 Desarrollo de la curva de distribución del tiempo de residencia

La solución de cloruro de sodio se inyectó al influente en el reactor como un pulso. Al cabo de cierto tiempo se tomaron varias muestras del efluente que posteriormente fueron medidas bajo el parámetro seleccionado, en este caso, se midió la *conductividad* (*gráf. 5.0, Apéndice*).

Tabla 5.2 a Características hidráulicas de la unidad UV

Q l/min	T (s)	t <sub>a</sub> (s)	t <sub>r</sub> /T	t <sub>p</sub> /T	t <sub>90</sub> /t <sub>10</sub>	t <sub>50</sub> /T	t <sub>90</sub> /t <sub>a</sub>
8.44	126.60	305.88	0.592	1.066	3.167	2.416	0.638
7.89	135.60	411.78	0.553	1.106	3.333	3.037	0.510
7.21	148.20	441.00	0.540	1.012	3.150	2.976	0.913
5.20	205.20	390.00	0.390	0.828	5.500	1.901	0.538
4.67	228.60	456.60	0.394	0.831	5.000	1.997	0.504
3.75	285.00	549.00	0.421	0.842	5.125	1.926	0.583
3.38	316.20	434.40	0.474	0.949	3.525	1.372	0.829
3.08	347.40	574.20	0.490	0.864	3.929	1.653	0.731
2.59	412.80	1000.20	0.436	0.848	6.667	2.423	0.590
EPA,86			> 0.5	> 0.9	< 2	1	0.9-1.1

- T = Tiempo teórico entre el puerto de inyección del trazador y el de muestreo.
- t<sub>a</sub> = Tiempo promedio entre el puerto de inyección del trazador y el de muestreo.
- t<sub>r</sub> = Tiempo al cual aparece por primera vez el trazador.
- t<sub>p</sub> = Tiempo al cual la concentración máxima del trazador es enriquecida.
- t<sub>10</sub>, t<sub>50</sub>, t<sub>90</sub> = Tiempo al cual el 10, el 50 y el 90 % del trazador ha pasado por el reactor.

Considerando que el sistema de desinfección UV es abierto, se empleó la siguiente ecuación, según estudios reportados (*Levenspiel, 1972*) para hallar el número de dispersión ( $D/uL$ ) a diferentes flujos (ver *Tabla 5.2 b*):

$$\sigma_0^2 = \frac{\sigma^2}{tm^2} = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) - 8 \left( \frac{D}{uL} \right)^2 \quad \text{Ec. 5.1}$$



Tabla 5.2 b No. de dispersión,  $D/uL$  y no. de tanques completamente mezclados,  $m$

Q l/min	$t_c$ (min)	$\Sigma C_i$	$\Sigma t_i C_i$	$\Sigma t_i^2 C_i$	$\sigma^2$	$\sigma_i^2$	$D/uL$	$m$
8.44	5.098	26.21	128.745	888.141	9.757	0.375	0.125	4
7.89	6.863	26.79	117.595	724.744	7.785	0.165	0.046	11
7.21	7.350	32.68	122.750	660.201	6.094	0.113	0.047	11
5.20	6.500	27.28	162.023	1383.393	15.436	0.366	0.123	4
4.67	7.610	24.02	150.332	1301.313	15.006	0.259	0.094	6
3.75	9.150	33.44	317.373	4153.933	34.442	0.411	0.134	4
3.38	7.240	51.30	300.017	2376.478	12.123	0.231	0.086	6
3.08	9.570	51.59	411.430	4537.615	24.355	0.266	0.123	4
2.59	16.670	52.28	580.617	10679.266	80.929	0.291	0.103	5

$D/uL$  = número de dispersión (d)

$m$  = número de tanques completamente mezclados en serie,  $m = 1/2d$  (Levenspiel, 1972)

De los resultados obtenidos se puede observar que el número de dispersión se encuentra entre 0.046 y 0.134, y de acuerdo con Levenspiel (1972), la dispersión se encuentra comprendida en el intervalo:  $0.025 \leq D / uL \leq 0.2$ .

### 5.2 Caracterización microbiológica

Con los datos obtenidos de la desinfección del efluente proveniente del tratamiento fisico-químico se procedió a realizar la caracterización microbiológica así como el valor de la constante de inactivación  $k_d$  para este sistema en particular.

En la gráfica 5.1 se presenta la reducción decimal (RD) para coliformes fecales, tanto para un caso ideal como para un real en función de la dosis UV, así como sus respectivas ecuaciones. Los resultados se obtienen considerando una cinética de mezclado de segundo orden (Nieuwstad, 1991), por lo que el número de organismos sobrevivientes se da por la siguiente ecuación:

$$N = N_0 e^{-k_d t} = N_0 e^{-k_d H} \quad \text{Ec. 5.2}$$

Donde:

$N$  = No. de organismos sobrevivientes por unidad de volumen, *organismos/cm<sup>3</sup>*

$N_0$  = No. original de microorganismos, *organismos/cm<sup>3</sup>*

$k$  = constante de inactivación en base de  $\log_e$ , *m<sup>2</sup>/J*

$I$  = intensidad UV promedio en el reactor, *W/m<sup>2</sup>*

$t_m$  = tiempo de retención promedio, *s*

$K_d$  = constante de inactivación en base de  $\log_{10}$ , *m<sup>2</sup>/J*

$H$  = dosis UV =  $I \cdot t_m$ , *J/m<sup>2</sup>*

y la reducción decimal (RD) está dada por:

$$RD = \log_{10} (N_0/N) = 0.4343 K H = K_d H \quad \text{Ec. 5.3}$$

De acuerdo a la ecuación anterior, la reducción decimal debe ser lineal con la dosis UV.

### 5.2.1 Constante de inactivación, $K_d$

La constante de inactivación se determinó considerando los siguientes datos:

Q (m <sup>3</sup> /h)	t <sub>m</sub> (s)	I (W/m <sup>2</sup> )	H (J/m <sup>2</sup> )	N <sub>0</sub> (org./cm <sup>3</sup> )	N (org./cm <sup>3</sup> )
0.2028	432	0.85	367.20	4140.00	341.00
0.1848	576	0.85	489.60	3466.67	213.33
0.1554	1002	0.85	851.70	3566.00	23.20

El número de organismos iniciales representativos se basó en el muestreo realizado en los meses de mayo de 1997 para los dos primeros flujos, para el tercero se consideró mayo y junio de 1997, esto permitió tener representatividad en los resultados.

Empleando la siguiente fórmula exponencial se obtuvieron los siguientes datos:

$$N/N_0 = e^{-k_d \cdot H} \quad \text{Ec. 5.4}$$

Mediante una regresión exponencial:

$H_i$ (J/m <sup>2</sup> )	367.20	489.60	851.70	$K_d = -0.005461 \text{ m}^2/\text{J}$
$N/N_0$	0.08236	0.06154	0.00650	$r = 0.990$

$r$  es el coeficiente de correlación

La constante de inactivación  $K_d$  para coliformes fecales puede ser comparada con respecto a otros microorganismos que han sido reportados (*Nieuwstad, 1991*), ver la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Constantes de inactivación y su valor relativo comparado con datos de literatura

Organismo*	$K_d$ (m <sup>2</sup> /J)	Nieuwstad, 1991	Havelaar, 1987
EC	0.0055	1.00	1
FS	0.0029	0.53	0.67
SSRC	0.00063	0.11	---
SC	0.0069	1.15	1.04
FSP	0.0023	0.42	0.43
MS2	0.0046	0.85	---
RV	0.0024	0.43	---

\*EC=E. coli; FS=Estreptococo fecal; SSRC=Esporas de clostridio reductoras de sulfito; SC=Colifagos somáticos; FSP=Bacteriófagos F-específico; MS2=Bacteriófagos MS2; RV=Reovirus.

Fuente: *Nieuwstad, 1991*

### 5.2.2 Reducción decimal para la caracterización microbiológica

Empleando la ecuación 5.3 y considerando los datos ideales (*Nieuwstad, 1991*) así como reales, se puede observar en la gráfica 5.1, una reducción decimal para ambos casos considerando para la caracterización microbiológica a coliformes fecales como parámetros indicadores de contaminación y mediante una línea de tendencia lineal se logró obtener una ecuación para el sistema UV.

### 5.3 Flujo no ideal: modelo de dispersión

Los resultados de la *Tabla 5.2b* confirman que de la caracterización hidráulica del reactor UV a diferentes flujos muestra una gran dispersión, por lo que existen algunos modelos utilizados para caracterizar un flujo no ideal y son llamados *modelos de dispersión*. El *modelo de tanques en serie* es ampliamente utilizado para representar un flujo no ideal (*Levenspiel, 1972*). El reactor UV puede ser modelado como un número de tanques completamente mezclados en serie. Para  $m$  tanques con un tiempo de retención  $t_r/m$  cada

uno, la reducción decimal RD está dada por la siguiente ecuación (*Nieuwstad, 1991*):

$$RD = 0.4343m \ln(1 + Hk/m) = 0.4343m \ln(1 + 2.3026 I_{nt} K_d/m) \quad \text{Ec. 5.5}$$

### 5.3.1 Reducción decimal para la caracterización de tanques completamente mezclados en serie

Empleando la ecuación 5.5 y considerando datos ideales (*Nieuwstad, 1991*) así como reales, se obtiene la gráfica 5.2, el procedimiento es similar al de la reducción decimal microbiológica, salvo que en este caso se considera el número de tanques en serie obtenidos de la caracterización hidráulica con base al número de dispersión  $d$ , también se emplea a coliformes fecales como indicadores de material fecal para la constante de inactivación  $K_d$ . Por último se obtiene una línea de tendencia con la correspondiente ecuación para cada conjunto de datos.

### 5.4 Resultados fisicoquímicos y microbiológicos

Después de haber desinfectado la muestra, se procedió a realizar los análisis respectivos, no sin antes diseñar hojas de campo que facilitaran el manejo rápido de resultados. Los resultados se muestran en las *tablas 5.4 a, b y c y 5.5 a y b del Apéndice*. Cabe mencionar que el porcentaje de remoción de coliformes fecales se obtiene inmediatamente después de haber llevado a cabo la desinfección.

**Gráfica 5.1 Reducción decimal RD ideal y real de caracterización microbiológica**

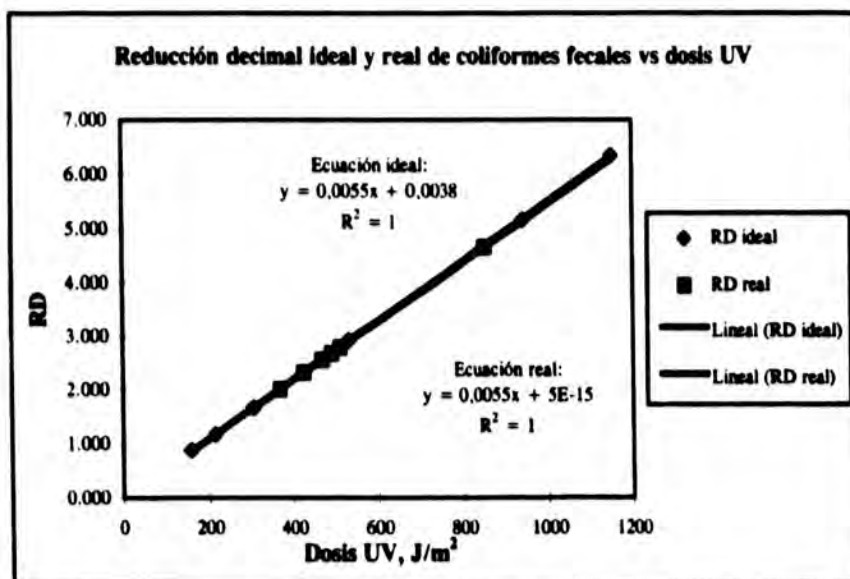
tm ideal, (s)	Dosis ideal (J/m <sup>2</sup> )	RD ideal	RD real	tm real (s)
7.080	1150.000	6.347		
5.660	940.000	5.168		
21.240	530.000	2.921		
12.140	304.000	1.669		
8.500	213.000	1.169		
6.640	157.000	0.876		
	367.2		2.005	432
	425.0		2.321	500
	467.5		2.553	550
Dosis (J/m <sup>2</sup> ) real	489.6		2.674	576
	510.0		2.785	600
	851.7		4.651	1002

**Reducción decimal (RD):**

$$DR = \log_{10} (N_0/N) = 0.4343K \cdot I_m \cdot t_m = k_d \cdot I_m \cdot t_m$$

$$K_d = 0.005461 \text{ m}^2/\text{J}$$

$$I_m = 0.85 \text{ W/m}^2$$



**Gráfica 5.2 Reducción decimal RD ideal y real para sistemas completamente mezclados en serie**

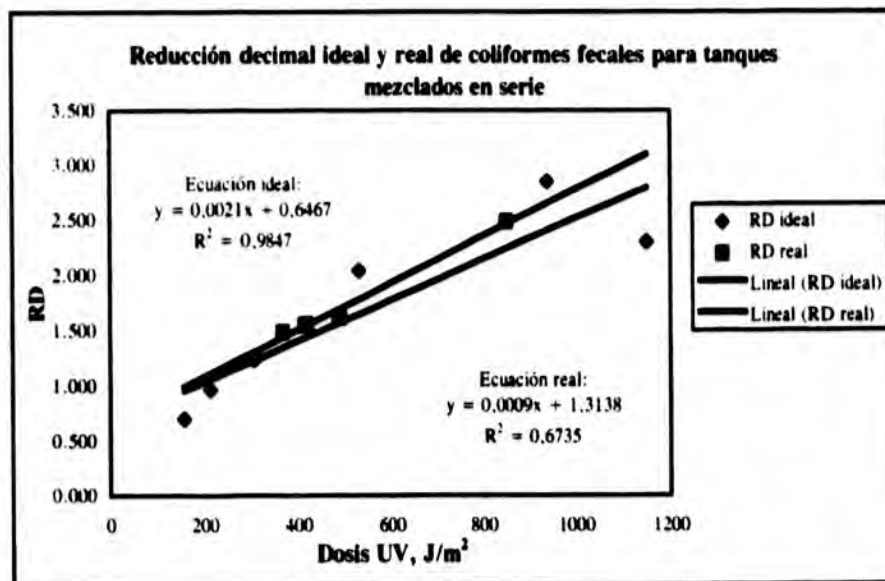
No.tanques ideal,m	Dosis (J/m <sup>2</sup> ) ideal	RD ideal	RD real	No.tanques real,m
3.0	1150.000	2.303		
6.0	940.000	2.849		
7.0	530.000	2.044		
5.0	304.000	1.240		
6.0	213.000	0.967		
4.0	157.000	0.701		
	367.2		1.487	6.0
	415.5		1.551	6.0
	417.5		1.557	4.0
<b>Dosis (J/m<sup>2</sup>) real</b>	489.6		1.619	4.0
	851.7		2.486	5.0

**Reducción decimal (RD):**

$$DR = 0.4343 \cdot m \cdot \ln(1 + 2.3026 \cdot Kd \cdot Im \cdot tm / m)$$

$$Kd = 0.005461 \text{ m}^2/\text{J}$$

$$Im = 0.85 \text{ W/m}^2$$



**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

### 5.5 Fotorreactivación

Kelner en 1951 (*Lindenauer, 1994*), recomendó que la fotorreactivación debería ser cuantificada como sigue:

$$\text{Grado de fotorreactivación} = \frac{N_{pr} - N}{N_0 - N} \quad \text{Ec. 5.6}$$

$$\% \text{ de fotorreactivación} = 100 * \frac{N_{pr} - N}{N_0 - N} \quad \text{Ec. 5.7}$$

Donde:

$N_0$  = No. de organismos expuestos a la radiación UV, *organismos/100 ml*

$N$  = No. de sobrevivientes a la desinfección UV, *organismos/100 ml*

$N_{pr}$  = No. de organismos después de fotorreactivación, *organismos/100 ml*

El grado de fotorreactivación representa la fracción de células inactivadas que han sido fotorreactivadas. La *tabla 5.6 del Apéndice* muestra el porcentaje de remoción de coliformes fecales instantes después de haber sido desinfectada la muestra, así como el grado y porcentaje de fotorreactivación para la muestras de la planta de Ojo de Agua.

### 5.6 Análisis de los resultados

A continuación se hace un análisis de los resultados obtenidos en función de los parámetros medidos, considerando un resultado fuera de Norma cuando rebasa los límites máximos permisibles de concentración establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas para aguas residuales de reuso agrícola.

#### 5.6.1 Conductividad

La conductividad no tuvo cambios considerables durante el proceso de desinfección, por lo que queda comprendido dentro de los límites máximos permisibles.

#### 5.6.2 Temperatura

La temperatura fue importante, ya que el proceso de desinfección por luz UV es físico y el calor se hace presente, al aumentar el tiempo de exposición promedio aumenta la temperatura

con una variación de 0.2 a 0.5 °C (ver gráficas 5.3a, 5.4a, 5.5a y 5.6a).

### 5.6.3 pH

Para todas las muestras, el pH tendió a incrementarse después de haber sido desinfectadas como lo presentan las gráficas correspondientes. El límite permisible es de 6.5 a 8.5. En este caso, éste queda dentro de los límites permisibles para los dos tipos de muestras (ver gráficas 5.3b, 5.4b, 5.5b y 5.6b)

### 5.6.4 Turbiedad

La turbiedad es un parámetro muy importante en el proceso de desinfección con UV, ya que al incrementarse el grado de desinfección disminuye, debido a que las partículas impiden que la luz ultravioleta penetre en todos los puntos del sistema. De los resultados obtenidos se ve claramente que las muestras provenientes del tratamiento físico-químico de Ojo de Agua (PPOA) contenían una turbiedad muy alta comparada con las muestras provenientes de los filtros de la Planta de Tratamiento de C.U., por lo que para las muestras de la PPOA se requirió de un mayor tiempo de contacto de las partículas a la exposición UV que para la de los filtros de C.U., como la muestran las gráficas respectivas (ver gráficas 5.3c, 5.4c, 5.5c y 5.6c)

### 5.6.5 Sólidos disueltos totales y sólidos suspendidos totales

Los sólidos suspendidos totales y disueltos totales son parámetros que fueron determinados para las muestras del tratamiento físico-químico. La literatura reporta sobre el efecto de los sólidos en la desinfección: *"un efecto adverso de sólidos suspendidos sobre la desinfección UV ha sido reportada por Qualls et al. (1985), Scheible (1987) y Ho y Bohm (1981), mientras Roeber y Hoot (1975), Venosa et al. (1978) y Wolf et al. (1979) no encontraron una relación significativa entre la concentración de sólidos suspendidos y el grado de desinfección"* (Nieuwstad, 1991).

### 5.6.6 Coliformes fecales

Los coliformes fecales se utilizan como indicadores de material fecal y dependiendo del reúso del agua tratada existe un límite máximo permisible, para el reúso agrícola es de 1000



UFC/100 ml de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas. Con esta restricción se puede evitar la posible contaminación de productos agrícolas con el empleo del riego y a su vez evitar efectos nocivos a la salud.

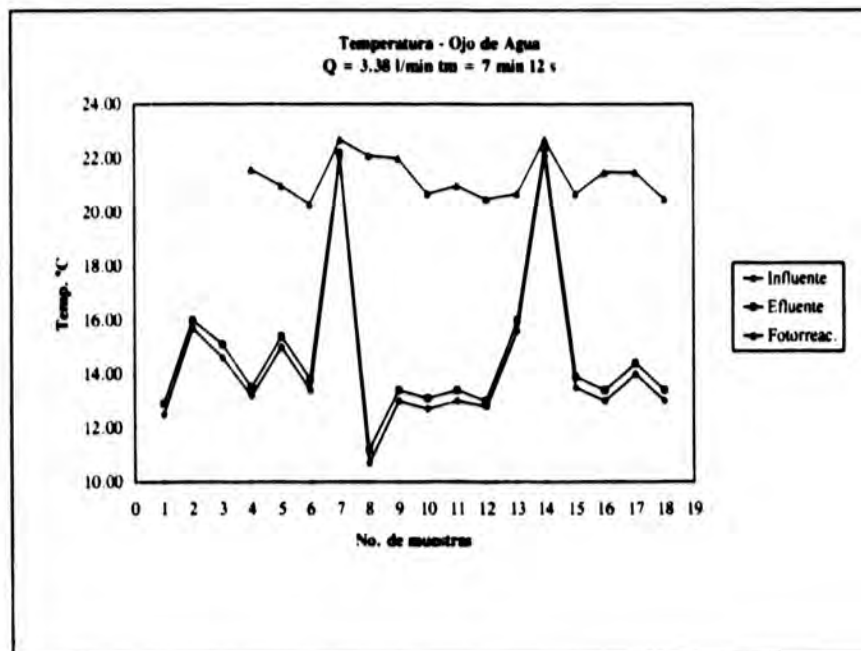
De los resultados obtenidos, encontramos que las muestras provenientes del tratamiento físico-químico contenían un índice muy alto de coliformes fecales con respecto a las muestras de los filtros de C.U., por tal motivo se requirieron tiempos de exposición de 18 a 20 minutos para alcanzar la Norma (datos obtenidos mediante una regresión polinómica-exponencial con los datos obtenidos de las *Tablas 5.4 a, b y c del Apéndice*). Para las muestras de los filtros de C.U. se logró alcanzar la Norma para coliformes fecales en un tiempo de 2.5 minutos (*ver gráficas 5.3 d, 5.4 d, 5.5 d y 5.6 d*).

### **5.7 Análisis comparativo de los resultados**

De los resultados obtenidos se puede hacer un análisis comparativo del conjunto de parámetros evaluados. Como se puede ver en las tablas y gráficas correspondientes, la turbiedad juega un papel importante en el proceso de desinfección mediante luz UV. Se puede observar que las muestras provenientes del tratamiento físico-químico presentan un alto grado de turbiedad por lo que impedía que la radiación UV penetrara a todas las partículas presentes en la muestra, por lo que se incrementó el tiempo de exposición, además, el contenido de coliformes fecales era demasiado alto con respecto a las muestras de los filtros de C.U. El alto contenido de turbiedad trae como consecuencia que la desinfección de microorganismos disminuya y como consecuencia se requiere aumentar la dosis de radiación UV. Sin embargo, se puede notar que para las muestras provenientes de los filtros de C.U., la dosis requerida fue mínima debido a la mejor calidad del agua.

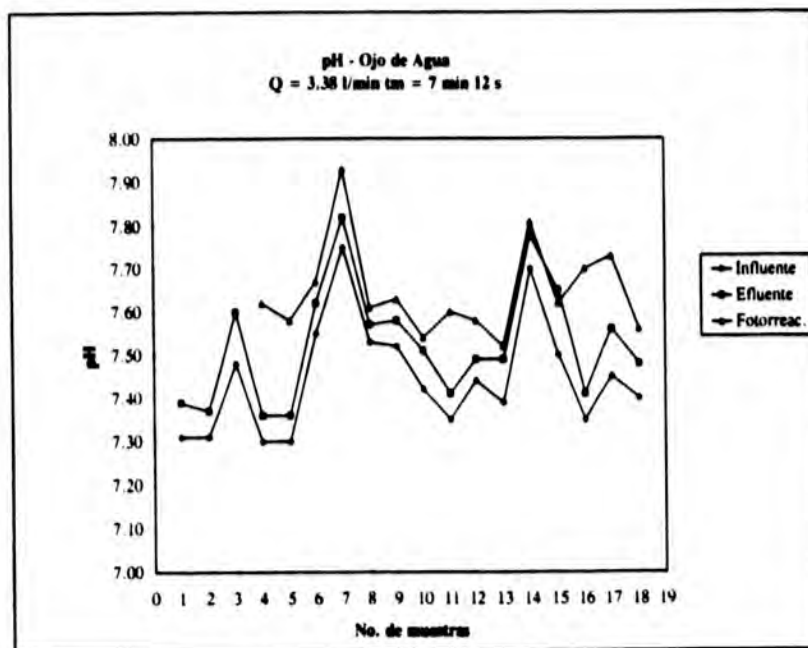
**Gráfica 5.3 a Resultados obtenidos de efluentes provenientes de tratamiento físico-químico de la planta de Ojo de Agua**

No. de muestra	Fecha de muestreo	Temp. °C		
		Influente	Efluente	Fotoreac.
1	29 Feb 96	12.50	12.90	
2	05 Mar 96	15.70	16.00	
3	17 Abr 96	14.60	15.10	
4	19 Abr 96	13.20	13.50	21.60
5	23 Abr 96	15.00	15.40	21.00
6	26 Abr 96	13.40	13.80	20.30
7	02 May 96	22.00	22.20	22.70
8	08 May 96	10.70	11.20	22.10
9	10 May 96	13.00	13.40	22.00
10	15 May 96	12.70	13.10	20.70
11	17 May 96	13.00	13.40	21.00
12	21 May 96	12.80	13.00	20.50
13	22 May 96	15.60	16.00	20.70
14	23 May 96	22.10	22.40	22.70
15	28 May 96	13.50	13.90	20.70
16	30 May 96	13.00	13.40	21.50
17	04 Jun 96	14.00	14.40	21.50
18	06 Jun 96	13.00	13.40	20.50
Mínimo		10.70	11.20	20.30
Máximo		22.10	22.40	22.70
Promedio		14.19	14.57	21.29
Desv. std		3.015	2.971	0.791



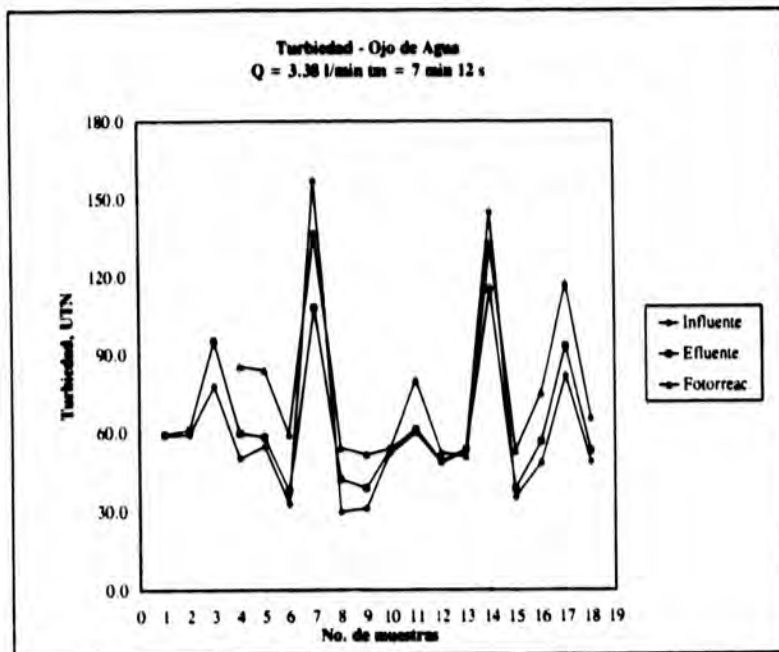
**Gráfica 5.3 b Resultados obtenidos de efluentes provenientes de tratamiento físico-químico de la planta de Ojo de Agua**

No. de muestr	Fecha de muestreo	pH		
		Influente	Efluente	Fotorreac.
1	29 Feb 96	7.31	7.39	
2	05 Mar 96	7.31	7.37	
3	17 Abr 96	7.48	7.60	
4	19 Abr 96	7.30	7.36	7.62
5	23 Abr 96	7.30	7.36	7.58
6	26 Abr 96	7.55	7.62	7.67
7	02 May 96	7.75	7.82	7.93
8	08 May 96	7.53	7.57	7.61
9	10 May 96	7.52	7.58	7.63
10	15 May 96	7.42	7.51	7.54
11	17 May 96	7.35	7.41	7.60
12	21 May 96	7.44	7.49	7.58
13	22 May 96	7.39	7.49	7.52
14	23 May 96	7.70	7.78	7.81
15	28 May 96	7.50	7.65	7.62
16	30 May 96	7.35	7.41	7.70
17	04 Jun 96	7.45	7.56	7.73
18	06 Jun 96	7.40	7.48	7.56
Mínimo		7.30	7.36	7.52
Máximo		7.65	7.82	7.93
Promedio		7.45	7.52	7.65
Desv. est.		0.130	0.136	0.109



**Gráfica 5.3 c Resultados obtenidos de efluentes provenientes de tratamiento físico-químico de la planta de Ojo de Agua**

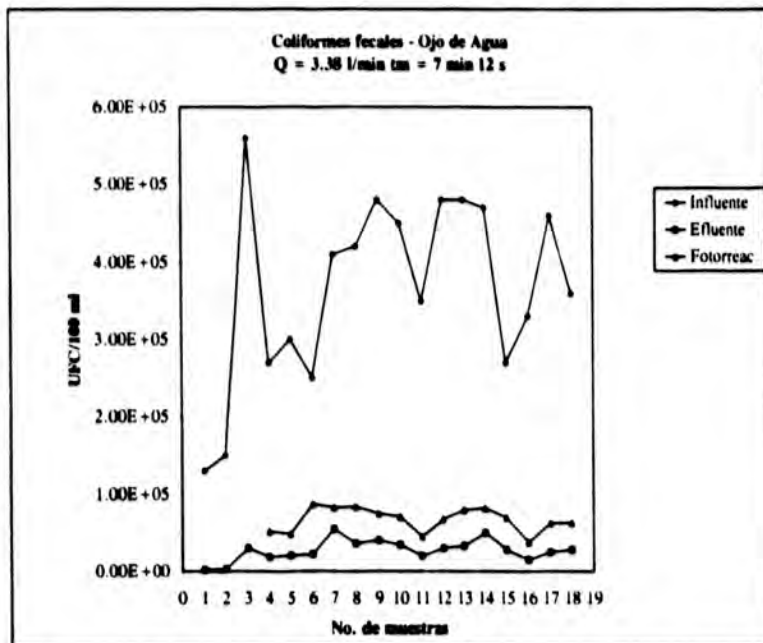
No. de muestra	Fecha de muestreo	Turbiedad UTN		
		Influyente	Efluente	Fotorreac.
1	29 Feb. 96	59.13	59.23	
2	05 Mar. 96	59.30	61.00	
3	17 Abr. 96	77.80	95.20	
4	19 Abr. 96	50.40	59.70	85.33
5	23 Abr. 96	54.90	58.20	83.90
6	26 Abr. 96	32.80	37.70	59.40
7	02 May. 96	157.00	108.00	137.00
8	08 May. 96	29.70	42.10	54.20
9	10 May. 96	31.10	38.80	51.70
10	15 May. 96	52.60	53.70	53.90
11	17 May. 96	60.00	61.00	80.00
12	21 May. 96	48.50	49.00	52.30
13	22 May. 96	53.20	53.50	51.00
14	23 May. 96	145.00	115.00	133.00
15	28 May. 96	35.40	38.60	53.00
16	30 May. 96	48.40	56.50	75.00
17	04 Jun. 96	81.70	93.20	117.30
18	06 Jun. 96	49.00	53.00	65.70
Mínimo		29.70	37.70	51.00
Máximo		157.00	115.00	137.00
Promedio		55.97	59.39	72.26
Desv. est.		35.16	23.65	29.86



**Gráfica 5.3 d Resultados obtenidos de efluentes provenientes de tratamiento físico-químico de la planta de Ojo de Agua**

No. de muestr	Fecha de muestreo	Coll. fec. UFC/100 ml		
		Influente	Efluente	Fotorreac.
1	29 Feb. 96	130000.0	2000.0	
2	05 Mar. 96	150000.0	3000.0	
3	17 Abr. 96	560000.0	30000.0	
4	19 Abr. 96	270000.0	19000.0	52000.0
5	23 Abr. 96	300000.0	21000.0	49000.0
6	26 Abr. 96	250000.0	22000.0	87000.0
7	02 May. 96	410000.0	55000.0	83000.0
8	08 May. 96	420000.0	36000.0	84000.0
9	10 May. 96	480000.0	40000.0	75000.0
10	15 May. 96	450000.0	34000.0	71000.0
11	17 May. 96	350000.0	20000.0	45000.0
12	21 May. 96	480000.0	30000.0	68000.0
13	22 May. 96	480000.0	33000.0	80000.0
14	23 May. 96	470000.0	50000.0	82000.0
15	28 May. 96	270000.0	28000.0	70000.0
16	30 May. 96	330000.0	15000.0	38000.0
17	04 Jun. 96	460000.0	25000.0	63000.0
18	06 Jun. 96	360000.0	28000.0	63000.0

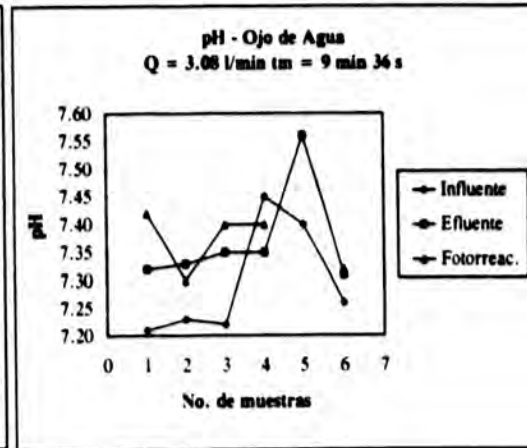
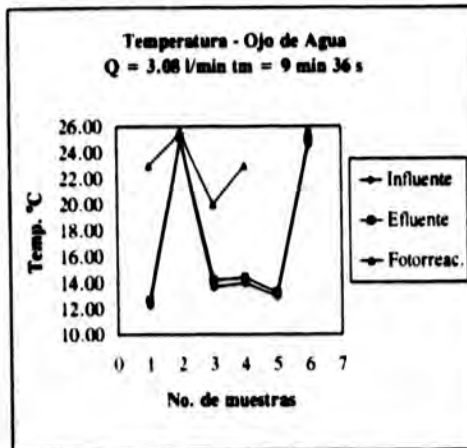
Mínimo	130000.00	2000.00	38000.00
Máximo	560000.00	55000.00	87000.00
Promedio	344205.52	21801.78	65479.53
Dev. std.	120857.90	13497.60	15430.33



**Gráfica 5.4 a y b Resultados obtenidos de efluentes provenientes de tratamiento físico-químico de la planta de Ojo de Agua**

No. de muestra	Fecha de muestreo	Temp. °C		
		Influente	Efluente	Fotorreac.
1	29 May. 96	12.30	12.70	23.00
2	30 May. 96	25.00	25.30	25.60
3	31 May. 96	13.70	14.20	20.00
4	04 Jun. 96	14.00	14.40	23.00
5	06 Jun. 96	13.00	13.30	
6	11 Jun. 96	24.60	25.00	25.70
Mínimo		12.30	12.70	20.00
Máximo		25.00	25.30	25.60
Promedio		16.32	16.72	23.36
Desv. std.		5.995	5.971	2.345

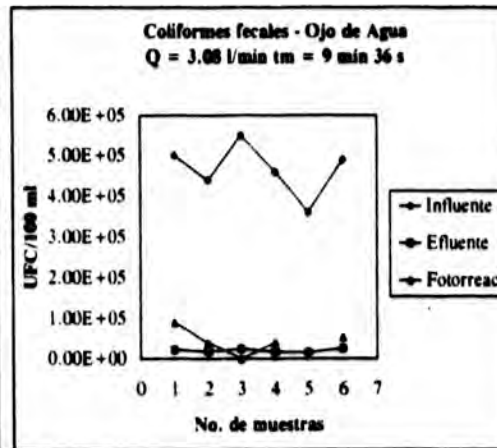
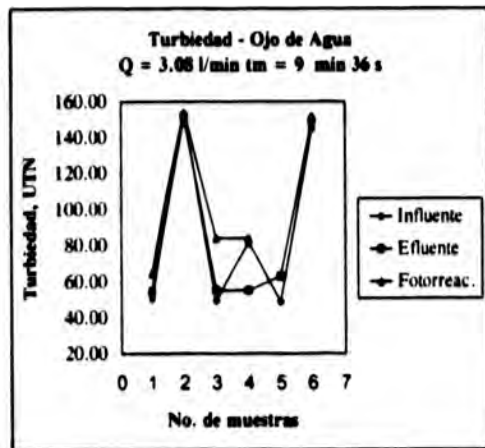
No. de muestra	Fecha de muestreo	pH		
		Influente	Efluente	Fotorreac.
1	29 May. 96	7.21	7.32	7.42
2	30 May. 96	7.23	7.33	7.30
3	31 May. 96	7.22	7.35	7.40
4	04 Jun. 96	7.45	7.35	7.40
5	06 Jun. 96	7.40	7.56	
6	11 Jun. 96	7.26	7.31	7.32
Mínimo		7.21	7.31	7.30
Máximo		7.45	7.56	7.42
Promedio		7.29	7.37	7.37
Desv. std.		0.103	0.094	0.054



**Gráfica 5.4 c y d Resultados obtenidos de efluentes provenientes de tratamiento físico-químico de la planta de Ojo de Agua**

No. de muestra	Fecha de muestreo	Turbiedad UTN		
		Influente	Efluente	Fotorreac.
1	29 May '96	50.70	54.60	64.70
2	30 May '96	152.00	152.00	154.00
3	31 May '96	49.70	55.30	84.10
4	04 Jun. '96	81.70	55.30	84.10
5	06 Jun. '96	49.00	63.00	
6	11 Jun. '96	145.00	149.00	152.00
Mínimo		49.00	54.60	64.70
Máximo		152.00	152.00	154.00
Promedio		77.83	78.74	101.38
Desv. std.		48.51	48.37	42.04

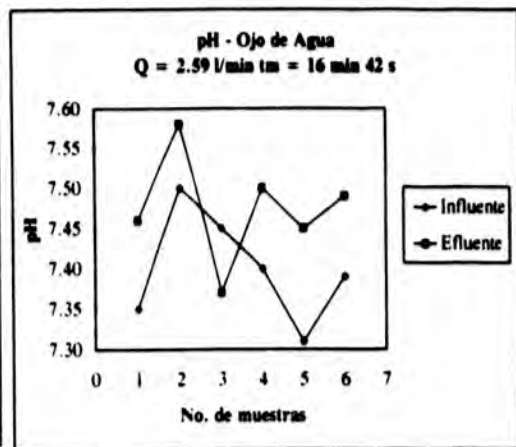
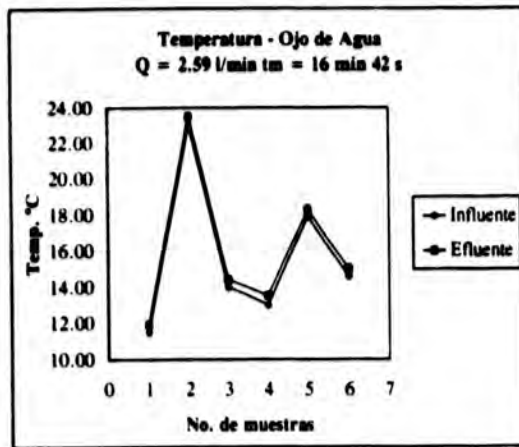
No. de muestra	Fecha de muestreo	Coli. fecales UFC/100 ml		
		Influente	Efluente	Fotorreac.
1	29 May. '96	500000.0	22000.0	90000.0
2	30 May '96	440000.0	18000.0	39000.0
3	31 May '96	550000.0	24000.0	INC
4	04 Jun. '96	460000.0	17000.0	40000.0
5	06 Jun. '96	360000.0	15000.0	
6	11 Jun. '96	490000.0	25000.0	53000.0
Mínimo		360000.00	15000.00	39000.00
Máximo		550000.00	25000.00	90000.00
Promedio		462743.47	19818.21	52228.88
Desv. std.		64394.62	4070.22	23867.69



**Gráfica 5.5 a y b Resultados obtenidos de efluentes provenientes de tratamiento físico-químico de la planta de Ojo de Agua**

No. de muestra	Fecha de muestreo	Temp. °C	
		Influente	Efluente
1	29 May. 96	11.50	11.90
2	30 May. 96	23.00	23.50
3	04 Jun. 96	14.00	14.40
4	06 Jun. 96	13.00	13.50
5	11 Jun. 96	17.90	18.30
6	13 Jun. 96	14.60	15.00
Mínimo		11.50	11.90
Máximo		23.00	23.50
Promedio		15.25	15.69
Desv. std		4.18	4.20

No. de muestra	Fecha de muestreo	pH	
		Influente	Efluente
1	29 May. 96	7.35	7.46
2	30 May. 96	7.50	7.58
3	04 Jun. 96	7.45	7.37
4	06 Jun. 96	7.40	7.50
5	11 Jun. 96	7.31	7.45
6	13 Jun. 96	7.39	7.49
Mínimo		7.31	7.37
Máximo		7.50	7.58
Promedio		7.40	7.47
Desv. std		0.07	0.07

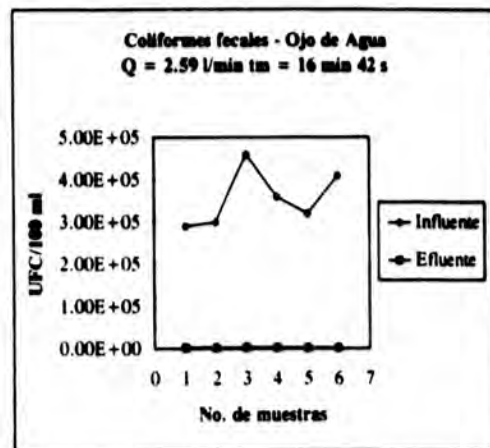
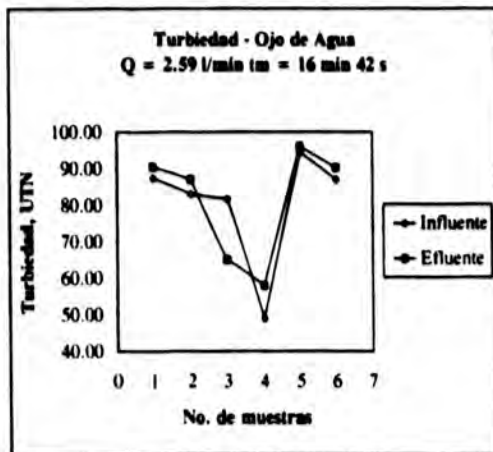




**Gráfica 5.5 c y d Resultados obtenidos de efluentes provenientes de tratamiento físico-químico de la planta de Ojo de Agua**

No. de muestra	Fecha de muestreo	Turbiedad UTN	
		Influente	Efluente
1	29 May. 96	87.40	90.50
2	30 May. 96	83.00	87.00
3	04 Jun. 96	81.70	65.00
4	06 Jun. 96	49.00	58.00
5	11 Jun. 96	94.50	96.00
6	13 Jun. 96	87.00	90.20
Mínimo		49.00	65.00
Máximo		94.50	96.00
Promedio		78.76	79.74
Desv. std.		16.04	15.63

No. de muestra	Fecha de muestreo	Coll. fecales UFC/100 ml	
		Influente	Efluente
1	29 May. 96	290000.0	1900.0
2	30 May. 96	300000.0	1800.0
3	04 Jun. 96	460000.0	2500.0
4	06 Jun. 96	360000.0	1800.0
5	11 Jun. 96	320000.0	1700.0
6	13 Jun. 96	410000.0	1900.0
Mínimo		290000.00	1700.00
Máximo		460000.00	2500.00
Promedio		351629.72	1917.52
Desv. std.		67131.71	287.52

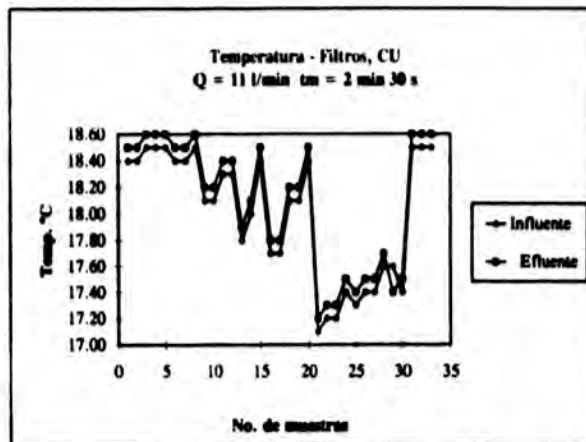


**Gráfica 5.6 a Resultados obtenidos de efluentes provenientes de los filtros de la planta de C.U.**

No. de muestra	Fecha de muestreo	Temp. °C	
		Influente	Efluente
1	04 Feb. 97	18.40	18.50
2	04 Feb. 97	18.40	18.50
3	04 Feb. 97	18.50	18.60
4	04 Feb. 97	18.50	18.60
5	04 Feb. 97	18.50	18.60
6	07 Feb. 97	18.40	18.50
7	07 Feb. 97	18.40	18.50
8	07 Feb. 97	18.50	18.60
9	10 Feb. 97	18.10	18.20
10	10 Feb. 97	18.10	18.20
11	10 Feb. 97	18.30	18.40
12	10 Feb. 97	18.30	18.40
13	11 Feb. 97	17.80	17.90
14	11 Feb. 97	18.00	18.10
15	11 Feb. 97	18.40	18.50
16	13 Feb. 97	17.70	17.80
17	13 Feb. 97	17.70	17.80
18	13 Feb. 97	18.10	18.20
19	13 Feb. 97	18.10	18.20
20	13 Feb. 97	18.40	18.50
21	17 Feb. 97	17.10	17.20
22	17 Feb. 97	17.20	17.30
23	17 Feb. 97	17.20	17.30
24	17 Feb. 97	17.40	17.50
25	18 Feb. 97	17.30	17.40
26	18 Feb. 97	17.40	17.50
27	18 Feb. 97	17.40	17.50
28	18 Feb. 97	17.60	17.70
29	18 Feb. 97	17.60	17.40
30	19 Feb. 97	17.40	17.50
31	19 Feb. 97	18.50	18.60
32	19 Feb. 97	18.50	18.60
33	19 Feb. 97	18.50	18.60

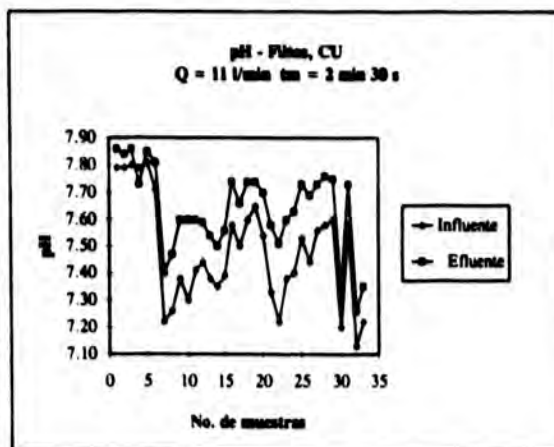
  

Mínimo	17.10	17.20
Máximo	18.50	18.60
Promedio	17.98	18.08
Desv. std.	0.484	0.494



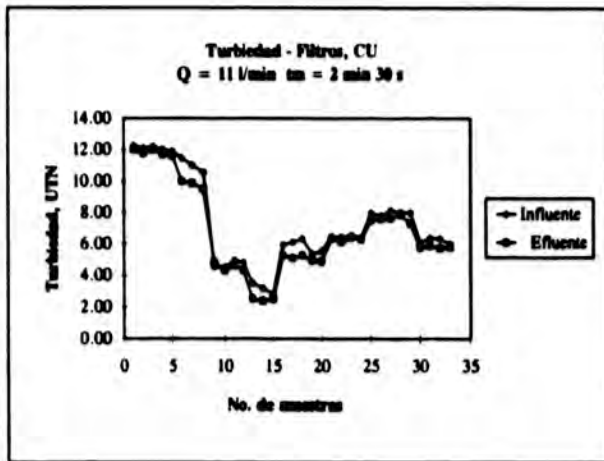
**Gráfica 5.6 b Resultados obtenidos de efluentes provenientes de los filtros de la planta de C.U.**

No. de muestra	Fecha de muestreo	pH	
		Influente	Efluente
1	04 Feb. 97	7.79	7.86
2	04 Feb. 97	7.79	7.84
3	04 Feb. 97	7.80	7.86
4	04 Feb. 97	7.79	7.73
5	04 Feb. 97	7.81	7.85
6	07 Feb. 97	7.71	7.81
7	07 Feb. 97	7.22	7.40
8	07 Feb. 97	7.26	7.47
9	10 Feb. 97	7.38	7.60
10	10 Feb. 97	7.30	7.60
11	10 Feb. 97	7.41	7.60
12	10 Feb. 97	7.44	7.59
13	11 Feb. 97	7.38	7.54
14	11 Feb. 97	7.35	7.50
15	11 Feb. 97	7.39	7.56
16	13 Feb. 97	7.58	7.74
17	13 Feb. 97	7.50	7.66
18	13 Feb. 97	7.60	7.74
19	13 Feb. 97	7.65	7.74
20	13 Feb. 97	7.54	7.70
21	17 Feb. 97	7.33	7.58
22	17 Feb. 97	7.22	7.51
23	17 Feb. 97	7.38	7.60
24	17 Feb. 97	7.40	7.63
25	18 Feb. 97	7.53	7.73
26	18 Feb. 97	7.44	7.69
27	18 Feb. 97	7.56	7.73
28	18 Feb. 97	7.58	7.76
29	18 Feb. 97	7.60	7.75
30	19 Feb. 97	7.20	7.32
31	19 Feb. 97	7.58	7.73
32	19 Feb. 97	7.13	7.26
33	19 Feb. 97	7.22	7.35
<b>Mínimo</b>		7.13	7.26
<b>Máximo</b>		7.81	7.86
<b>Promedio</b>		7.48	7.64
<b>Desv. std.</b>		0.196	0.157



**Gráfica 5.6 c Resultados obtenidos de efluentes provenientes de los filtros de la planta de C.U.**

No. de muestra	Fecha de muestro	Turbiedad UTN	
		Influente	Efluente
1	04 Feb. 97	12.27	12.01
2	04 Feb. 97	12.10	11.76
3	04 Feb. 97	12.20	12.00
4	04 Feb. 97	12.01	11.70
5	04 Feb. 97	11.90	11.60
6	07 Feb. 97	11.47	10.00
7	07 Feb. 97	11.00	9.87
8	07 Feb. 97	10.56	9.50
9	10 Feb. 97	4.57	4.83
10	10 Feb. 97	4.53	4.31
11	10 Feb. 97	4.96	4.63
12	10 Feb. 97	4.82	4.33
13	11 Feb. 97	3.53	2.53
14	11 Feb. 97	3.20	2.40
15	11 Feb. 97	2.80	2.50
16	13 Feb. 97	5.95	5.29
17	13 Feb. 97	6.13	5.10
18	13 Feb. 97	6.33	5.29
19	13 Feb. 97	5.38	4.95
20	13 Feb. 97	5.55	4.90
21	17 Feb. 97	6.46	6.38
22	17 Feb. 97	6.42	6.14
23	17 Feb. 97	6.55	6.42
24	17 Feb. 97	6.40	6.30
25	18 Feb. 97	7.98	7.52
26	18 Feb. 97	7.79	7.61
27	18 Feb. 97	8.15	7.64
28	18 Feb. 97	8.01	7.88
29	18 Feb. 97	7.99	7.32
30	19 Feb. 97	6.10	5.78
31	19 Feb. 97	6.37	5.89
32	19 Feb. 97	6.34	5.75
33	19 Feb. 97	6.00	5.80



Mínimo	2.80	2.40
Máximo	12.27	12.01
Promedio	6.81	6.28
Desv. std.	2.83	2.81

**Gráfica 5.6 d Resultados obtenidos de efluentes provenientes de los filtros de la planta de C.U.**

No. de muestra	Fecha de muestreo	Coli. fecal. UFC/100 ml	
		Influente	Efluente
1	04 Feb. 97	42500.0	100.0
2	04 Feb. 97	54500.0	100.0
3	04 Feb. 97	50000.0	100.0
4	04 Feb. 97	53000.0	0.0
5	04 Feb. 97	47000.0	0.0
6	07 Feb. 97	76000.0	500.0
7	07 Feb. 97	78333.3	600.0
8	07 Feb. 97	75000.0	433.3
9	10 Feb. 97	75333.3	133.3
10	10 Feb. 97	60000.0	100.0
11	10 Feb. 97	63000.0	100.0
12	10 Feb. 97	65000.0	0.0
13	11 Feb. 97	55333.3	100.0
14	11 Feb. 97	61500.0	133.3
15	11 Feb. 97	58000.0	100.0
16	13 Feb. 97	73666.7	166.7
17	13 Feb. 97	67500.0	100.0
18	13 Feb. 97	70000.0	133.3
19	13 Feb. 97	71000.0	133.3
20	13 Feb. 97	69000.0	100.0
21	17 Feb. 97	49700.0	133.3
22	17 Feb. 97	66000.0	133.3
23	17 Feb. 97	47000.0	100.0
24	17 Feb. 97	48300.0	0.0
25	18 Feb. 97	66500.0	100.0
26	18 Feb. 97	63000.0	100.0
27	18 Feb. 97	58000.0	100.0
28	18 Feb. 97	60000.0	0.0
29	18 Feb. 97	70000.0	0.0
30	19 Feb. 97	76500.0	300.0
31	19 Feb. 97	79000.0	500.0
32	19 Feb. 97	71500.0	150.0
33	19 Feb. 97	70000.0	0.0
Mínimo		42500.00	0.00
Máximo		79000.00	600.00
Promedio		62508.07	
Desv. std.		10319.92	152.17



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

La cloración ha sido por mucho tiempo aceptada y preferida como un método de desinfección de agua residual en la mayor parte del mundo. Sin embargo, al interactuar el cloro con los microcontaminantes presentes forma subproductos que han demostrado efectos adversos al ambiente, como es la toxicidad a la vida acuática.

Del estudio llevado a cabo con muestras procedentes de tratamientos diferentes, empleando radiación ultravioleta como medio alternativo a la cloración, y de los resultados obtenidos se llegó a las siguientes conclusiones:

**a) De la hidráulica del reactor:**

Las características dispersivas que se presentan en el reactor lo ubican fuera de las condiciones ideales de flujo pistón más sin embargo, de acuerdo a los resultados obtenidos se puede considerar que tiene las características de mezclado medio según literatura (*Levenspiel, 1972*).

**b) De la caracterización físico-química y bacteriológica:**

Con base en los resultados obtenidos se puede concluir que la eficiencia de desinfección dependerá de la calidad del agua en relación directa con la turbiedad.

**c) De la fotorreactivación:**

En las muestras procedentes de la planta de tratamiento físico-químico se presentó el efecto de reactivación microbiológica mientras que para la planta de ciudad universitaria el efecto fue nulo, esto se explica porque las partículas de las primeras muestras no son expuestas en su totalidad a la luz UV por la alta turbiedad que presenta y por lo tanto los microorganismos que han sido parcialmente dañados tienden a restablecerse.

**d) De la adaptación del modelo matemático:**

La reducción decimal microbiológica es un modelo matemático de gran utilidad que permite manejar las variables de tiempo de exposición real y flujo para este sistema en particular, ya que se utilizaron los datos del tratamiento físico-químico para determinar la constante de

inactivación  $k_d$  y esto permite predecir el comportamiento de desinfección. Además, la aplicación de esta alternativa de desinfección puede adaptarse a diferentes tipos de efluentes.

**e) Del diseño del reactor UV**

Los resultados obtenidos y el diseño del reactor estudiado se pueden considerar para mejorar el futuro diseño de sistemas de desinfección UV, determinando las características del reactor, calculando el número de lámparas necesarias, la configuración del sistema, el número de canales, las pérdidas de carga de la configuraciones seleccionadas para un caso en particular.

**RECOMENDACIONES**

a) Las muestras analizadas procedentes del tratamiento físico-químico, por el alto grado de turbiedad, requirieron de mayor tiempo de exposición que las muestras de los filtros de C.U. por lo que se recomienda adaptar un sistema de filtración después de un tratamiento físico-químico y de esta manera lograr un proceso eficiente de desinfección con UV.

b) El sistema de desinfección UV es una alternativa de desinfección, que en años anteriores no se consideraba debido a su alto costo, pero en la actualidad ya se dispone de tecnologías bien estudiadas y desarrolladas, por lo que hace posible que los costos de mantenimiento, mano de obra y operación se reduzcan, haciendo posible su fácil manejo y aplicación.

c) Se recomienda diseñar un tren de tratamiento para desinfectar agua residual empleando radiación ultravioleta con diferentes tipos de efluentes y llevarlo a comunidades pequeñas cuyo destino final sea en riego agrícola y de esta manera cumplir con la normatividad. También, instalar un sistema a nivel laboratorio que permita su manejo y estudio a futuras generaciones, con el deseo de motivar la investigación y el interés en el desarrollo de esta tecnología.

## BIBLIOGRAFÍA

---

APHA, AWWA, WPCF. *"Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater"*. 18 th Edition. American Public Health Association, Inc. Nueva York. 1992.

Carmineo, D., Contini E., Di Marino R., Donadio F., Liberti L. y Ranieri E. *"Wastewater Disinfection by UV at Trani Municipal Plant"*. Water Science and Technology. Vol. 30. No. 4. 1994. pp. 125-132

Diario Oficial de la Federación. *" NOM-CCA-032-ECOL/1993: que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales de origen urbano o municipal para su disposición mediante riego agrícola "*. Secretaría de Desarrollo Social. Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Protección Ambiental. 1993

Diario Oficial de la Federación. *" NOM-CCA-033-ECOL/1993: que establece las condiciones bacteriológicas para el uso de aguas residuales de origen urbano o municipal o de la mezcla de éstas con la de los cuerpos de agua, en el riego de hortalizas y productos hortofrutícolas "*. Secretaría de Desarrollo Social. Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Protección Ambiental. 1993

EPA. *"Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes"*. Environmental Protection Agency, U.S.A. 1983

Fahey, Richard J. *"The UV Effect on Wastewater"*. Water/Engineering & Management, Diciembre, 1990.

Gadgil, Ashok J. y Shown, Leslie J., *"To Drink Without Risk: The Use of Ultraviolet Light to Disinfect Drinking Water in Developing Countries"*, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA, U.S.A. Reporte. 6 pp. 1995

Gher, Ronald. *"Desinfección con UV y desinfección con OZONO"*. Conferencia. Ciudad Universitaria, UNAM. México. 1996

Gross, T.S.C. y Murphy R. *"Disinfection of Sewage Effluents: The Jersey Experience"*. Journal of the Institution of Water and Environment Management, IJWEM 92. Conference Paper. 1993. p.481-491.

Instituto de Ingeniería, UNAM. *"Tratabilidad del Agua Residual del Valle de México"*. Jiménez B. y Chávez A. 1995

Joklik, Willett, Amos. *"Microbiology: Sterilization and Disinfection"*. Zinsser. 17a. Edición. 1980

Karl E. Longley. *" Comparison of chlorine and chlorine dioxide as disinfectants."* Journal Water Pollution Control Federation, Vol. 52, pág. 2098, 1980

Koller, Lewis Richard. *"Ultraviolet radiation"*. Segunda Edición. New York, J. 312 p. 1965



---

Kreft, Peter., Scheible, O. Karl y Venosa, Albert. *"Hydraulic studies and cleaning evaluations of ultraviolet disinfections units"* J. Water Pollution Control Fed., Vol 58, No. 12. pp 1129-1137. 1986.

Langlais, Bruno. *"Ozone in water and Treatment : Application and Engineering "*. American Water Works Association. 569 pp. 1991

Levenspiel, Octave. *"Nonideal Flow: Chemical Reaction Engineering"*. Department of Chemical Engineering Oregon State University. Segunda Edición. 1972

Lindenauer, Karl G., y Darby, Jeannie L. *"Ultraviolet Disinfection of Wastewater: Effect of Dose on Subsequent Photoreactivation"*. Water Research. Vol. 28. No. 4. pp. 805 - 817. 1994

Lovera, Sara. Reporte Nacional: *La Jornada*. Sábado 3 de Junio de 1995.

Qualls, Robert G., Dorfman, Mark H. y Johnson, J. Donald. *"Evaluation of the Efficiency of Ultraviolet Systems"*. Water Research. Vol. 23, No. 3, pp. 317-325. 1989.

Sánchez R., Narda. *"Análisis comparativo de las tecnologías de ozonación y radiación ultravioleta como alternativas a la cloración en el tratamiento de agua municipal "*. Tesis, UNAM. 192 p. 1991.

Severin, B.F. *"Disinfection of municipal wastewater effluents with ultraviolet light "*. JWPCF. Vol. 52, Nos. 7-8, pp 2007-2018, 1980.

Water Disinfection. *"Ultraviolet Light Disinfection of Wastewater"*. Manual of Practice FD-10, WPCF, 1986

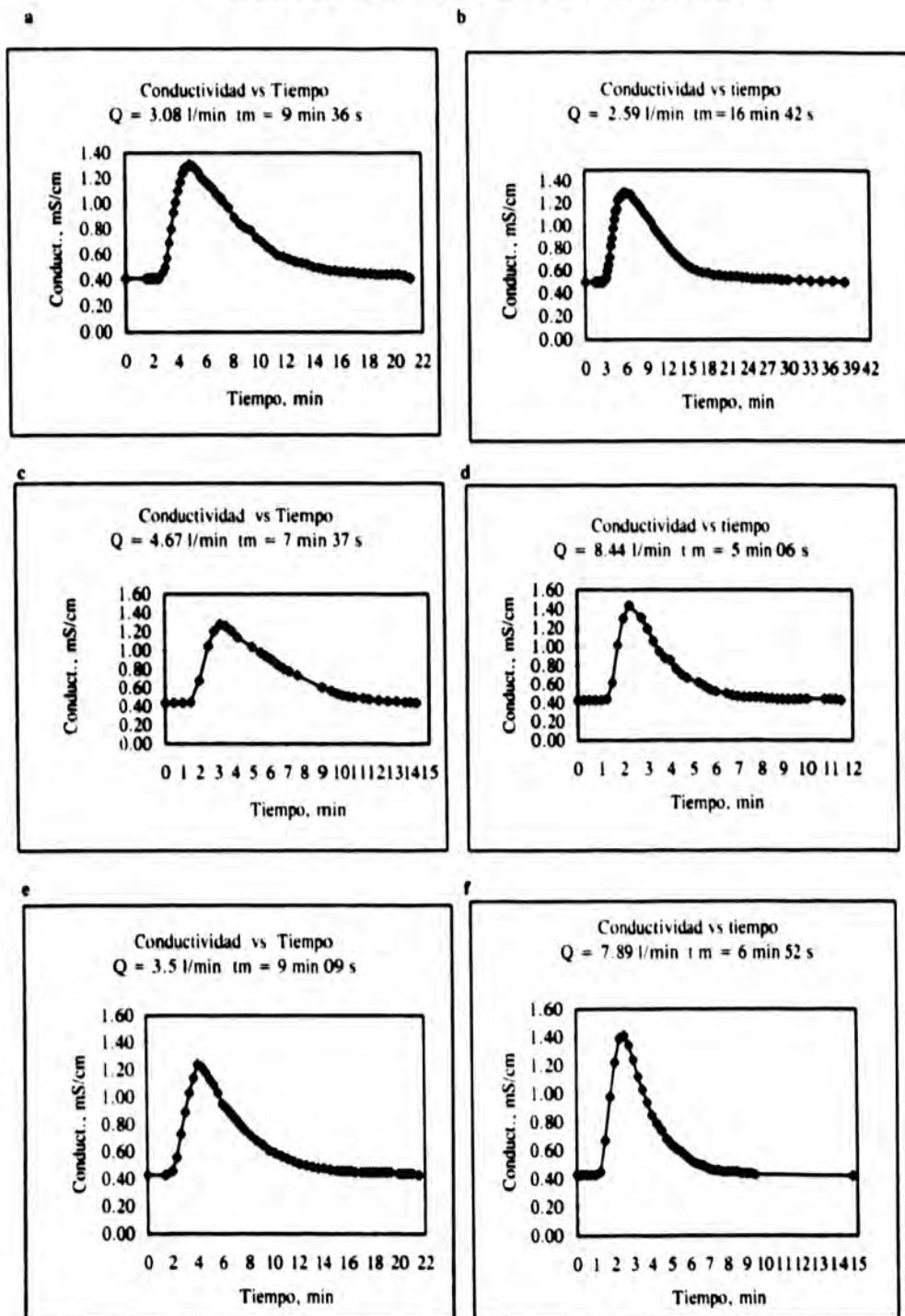
WERF. *"Comparison of UV irradiation to chlorination: Guidance for Achieving Optimal UV Performance. Disinfection"*. Water Environment Research Foundation. Project 91-WWD-1. 1995

Whitby, G.Elliott., Palmateer, Garry., Cook, Walter G. y Maarschalkerweerd, Jan. *"Ultraviolet disinfection of secondary effluent"*. JWPCF. Vol. 26, Nos. 6-8, pp. 844-850, 1984.

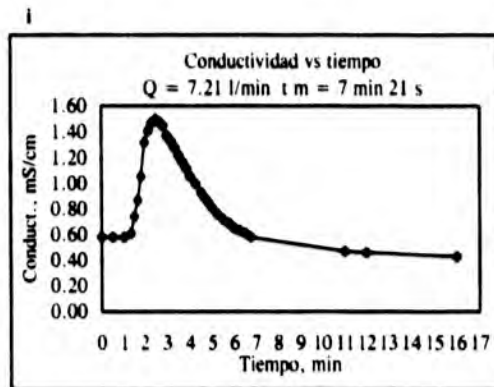
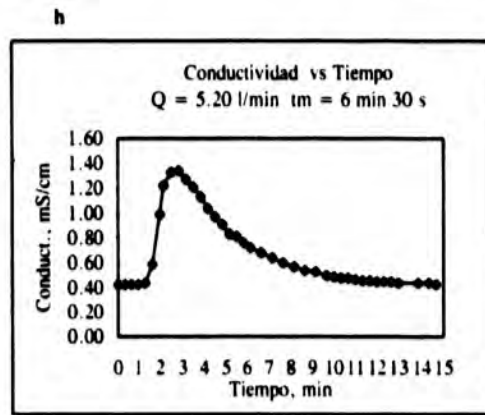
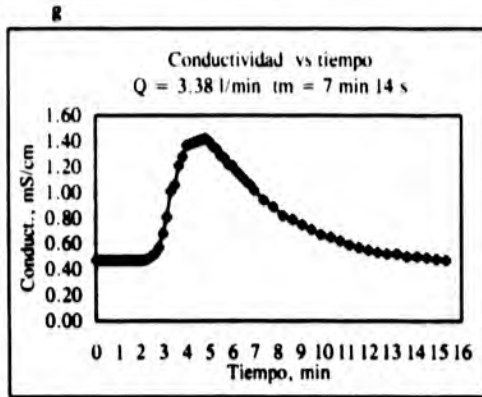
Whithe, Geo. Clifford. *"Ultraviolet Radiation and AO<sub>2</sub>Ps"* Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants. 1992. p.1206-1236.

# APÉNDICE

Gráfica 5.0 Resultados de trazado para el reactor UV



**Gráfica 5.0 Resultados de trazado para el reactor UV**



**Tabla 5.4 a Resultados obtenidos de efluentes provenientes del tratamiento físico-químico de la planta de Ojo de Agua**

Condiciones de desinfección:

Desinfectante:	<u>Radiación Ultravioleta</u>	Tipo de agua:	<u>Residual</u>
Flujo:	3.38 l/min	Procedencia de la muestra:	<u>Ojo de Agua</u>
Tiempo de exposición:	7 min 12 s		

Fecha de muestreo	Tipo de agua	Conduct. mS/cm	Temp. °C	pH	Turbiedad UTN	SST mg/l	SDT mg/l	Coliformes fecales UFC/100 ml	% Remoción CV
29 Feb 96	Influente	2.30	12.50	7.31	59.13	39.67	932.00	130000.0	98.46
	Efluente	2.19	12.90	7.39	59.23	28.00	851.40	2000.0	
05 Mar 96	Influente	2.33	15.70	7.31	59.30	37.00	1134.00	150000.0	98.00
	Efluente	2.24	16.00	7.37	61.00	34.00	878.00	3000.0	
17 Abr 96	Influente	2.06	14.60	7.48	77.80	52.50	1092.00	560000.0	94.64
	Efluente	1.97	15.10	7.60	95.20	38.50	1046.00	30000.0	
19 Abr 96	Influente	2.56	13.20	7.30	50.40	66.50	1284.00	270000.0	92.96
	Efluente	2.52	13.50	7.36	59.70	52.00	1312.00	19000.0	
	Fotorr	2.57	21.60	7.62	85.33	54.50	1317.00	52000.0	
23 Abr 96	Influente	2.56	15.00	7.30	54.90	69.00	1280.00	300000.0	93.00
	Efluente	2.50	15.40	7.36	58.20	54.00	1278.00	21000.0	
	Fotorr	2.56	21.00	7.58	83.90	54.00	1352.00	49000.0	
26 Abr 96	Influente	2.68	13.40	7.55	32.80	13.00	1410.00	250000.0	91.20
	Efluente	2.65	13.80	7.62	37.70	12.50	1505.00	22000.0	
	Fotorr	2.66	20.30	7.67	59.40	22.50	1549.00	87000.0	
02 May 96	Influente	2.68	22.00	7.75	157.00	171.00	1286.00	410000.0	86.59
	Efluente	2.61	22.20	7.82	108.00	114.00	1269.00	55000.0	
	Fotorr	2.64	22.70	7.93	137.00	119.00	1309.00	83000.0	
08 May 96	Influente	2.71	10.70	7.53	29.70	18.50	779.50	420000.0	91.43
	Efluente	2.64	11.20	7.57	42.10	22.00	832.50	36000.0	
	Fotorr	2.54	22.10	7.61	54.20	19.50	848.50	84000.0	
10 May 96	Influente	2.72	13.00	7.52	31.10	21.00	768.00	480000.0	91.67
	Efluente	2.64	13.40	7.58	38.80	23.00	804.00	40000.0	
	Fotorr	2.56	22.00	7.63	51.70	18.00	849.00	75000.0	
15 May 96	Influente	2.28	12.70	7.42	52.60	28.00	1187.00	450000.0	92.44
	Efluente	2.29	13.10	7.51	53.70	26.00	1270.00	34000.0	
	Fotorr	2.23	20.70	7.54	53.90	22.00	1168.00	71000.0	
17 May 96	Influente	2.60	13.00	7.35	60.00	50.50	1135.00	350000.0	94.29
	Efluente	2.56	13.40	7.41	61.00	45.00	1180.00	20000.0	
	Fotorr	2.62	21.00	7.60	80.00	48.00	1195.00	45000.0	
21 May 96	Influente	2.10	12.80	7.44	48.50	33.00	1150.00	480000.0	93.75
	Efluente	2.09	13.00	7.49	49.00	32.00	1195.00	30000.0	
	Fotorr	2.12	20.50	7.58	52.30	34.00	1150.00	68000.0	
22 May 96	Influente	2.29	15.60	7.39	53.20	30.00	1232.00	480000.0	93.13
	Efluente	2.30	16.00	7.49	53.50	30.00	1364.00	33000.0	
	Fotorr	2.22	20.70	7.52	51.00	23.00	1198.00	80000.0	
23 May 96	Influente	2.50	22.10	7.70	145.00	160.00	1235.00	470000.0	89.36
	Efluente	2.46	22.40	7.78	115.00	125.00	1222.00	50000.0	
	Fotorr	2.48	22.70	7.81	133.00	133.00	1286.00	82000.0	
28 May 96	Influente	2.63	13.50	7.50	35.40	15.50	1395.00	270000.0	89.63
	Efluente	2.60	13.90	7.65	38.60	13.50	1500.00	28000.0	
	Fotorr	2.70	20.70	7.62	53.00	23.50	1539.00	70000.0	
30 May 96	Influente	2.60	13.00	7.35	48.40	56.00	1196.00	330000.0	95.45
	Efluente	2.55	13.40	7.41	56.50	49.50	1215.00	15000.0	
	Fotorr	2.58	21.50	7.70	75.00	53.00	1220.00	38000.0	
04 Jun 96	Influente	2.00	14.00	7.45	81.70	50.50	1115.00	460000.0	94.57
	Efluente	1.95	14.40	7.56	93.20	37.50	985.00	25000.0	
	Fotorr	2.10	21.50	7.73	117.30	86.00	1005.00	63000.0	
06 Jun 96	Influente	2.20	13.00	7.40	49.00	27.00	1050.00	360000.0	92.22
	Efluente	2.26	13.40	7.48	53.00	23.00	1165.00	28000.0	
	Fotorr	2.20	20.50	7.56	65.70	19.00	1008.00	63000.0	

**Tabla 5.4 b Resultados obtenidos de efluentes provenientes del tratamiento físico-químico de la planta de Ojo de Agua**

Condiciones de desinfección:

Desinfectante:	<u>Radiación Ultravioleta</u>	Tipo de agua:	<u>Residual</u>
Flujo:	<u>3.08 l/min</u>	Velocidad:	<u>7</u>
Tiempo de exposición:	<u>9 min 36 s</u>	Procedencia de la muestra:	<u>Ojo de Agua</u>

Fecha de muestreo	Tipo de agua	Conduct. mS/cm	Temp. °C	pH	Turbiedad UTN	SST mg/l	SDT mg/l	Coliformes fecales UFC/100 ml	% Remoción CF
29 May. 96	Influente	2.03	12.30	7.21	50.70	44.00	1013.00	500000.0	95.60
	Efluente	2.03	12.70	7.32	54.60	25.50	1055.00	22000.0	
	Fotorr	2.02	23.00	7.42	64.70	24.00	1011.00	90000.0	
30 May. 96	Influente	1.97	25.00	7.23	152.00	39.00	1101.00	440000.0	95.91
	Efluente	1.96	25.30	7.33	152.00	30.00	1261.00	18000.0	
	Fotorr	1.96	25.60	7.30	154.00	31.00	1240.00	39000.0	
31 May. 96	Influente	2.04	13.70	7.22	49.70	49.00	990.00	550000.0	95.64
	Efluente	2.04	14.20	7.35	55.30	22.00	1050.00	24000.0	
	Fotorr	2.02	20.00	7.40	84.10	23.00	1000.00	INC	
04 Jun. 96	Influente	2.00	14.00	7.45	81.70	50.50	1115.00	460000.0	96.30
	Efluente	2.03	14.40	7.35	55.30	49.00	990.00	17000.0	
	Fotorr	2.02	23.00	7.40	84.10	22.00	1022.00	40000.0	
06 Jun. 96	Influente	2.20	13.00	7.40	49.00	27.00	1050.00	360000.0	95.83
	Efluente	2.21	13.30	7.56	63.00	25.00	930.00	15000.0	
	Fotorr								
11 Jun. 96	Influente	2.00	24.60	7.26	145.00	33.00	1090.00	490000.0	94.90
	Efluente	1.96	25.00	7.31	149.00	32.00	1288.00	25000.0	
	Fotorr	1.94	25.70	7.32	152.00	25.00	1210.00	53000.0	

**Tabla 5.4 c Resultados obtenidos de efluentes provenientes del tratamiento físico-químico de la planta de Ojo de Agua**

Condiciones de desinfección:

Desinfectante:	<u>Radiación Ultravioleta</u>	Tipo de agua:	<u>Residual</u>
Flujo:	<u>2.59 l/min</u>	Velocidad:	<u>5.5</u>
Tiempo de exposición:	<u>16 min 42 s</u>	Procedencia de la muestra:	<u>Ojo de Agua</u>

Fecha de muestreo	Tipo de agua	Conduct. mS/cm	Temp. °C	pH	Turbiedad UTN	SST mg/l	SDT mg/l	Coliformes fecales UFC/100 ml	% Remoción CF
29 May. 96	Influente	2.10	11.50	7.35	87.40			290000.0	99.34
	Efluente	1.98	11.90	7.46	90.50	ND	ND	1900.0	
	Fotorr								
30 May. 96	Influente	2.50	23.00	7.50	83.00			300000.0	99.40
	Efluente	2.50	23.50	7.58	87.00	ND	ND	1800.0	
	Fotorr								
04 Jun. 96	Influente	2.00	14.00	7.45	81.70			460000.0	99.46
	Efluente	2.00	14.40	7.37	65.00	ND	ND	2500.0	
	Fotorr								
06 Jun. 96	Influente	2.20	13.00	7.40	49.00			360000.0	99.50
	Efluente	2.20	13.50	7.50	58.00	ND	ND	1800.0	
	Fotorr								
11 Jun. 96	Influente	2.08	17.90	7.31	94.50			320000.0	99.47
	Efluente	2.06	18.30	7.45	96.00	ND	ND	1700.0	
	Fotorr								
13 Jun. 96	Influente	2.12	14.60	7.39	87.00			410000.0	99.54
	Efluente	2.00	15.00	7.49	90.20	ND	ND	1900.0	
	Fotorr								

ND = No determinado

**Tabla 5.5 a Resultados obtenidos de efluentes provenientes de los filtros de la planta de C.U.**

Condiciones de desinfección:

Desinfectante: Radiación Ultravioleta Tipo de agua: Residual  
 Flujo: 11.0 l/min Procedencia de la muestra: Filtros de C.U.  
 Tiempo de exposición: 2 min 30 s

Fecha de muestreo	Tipo de agua	Conduct. mS/cm	Temp. °C	pH	Turbiedad UTN	SDT mg/l	Coliformas focales UFC/100 ml	% Remoción CF
04 Feb 97	Influente	0.910	18.40	7.79	12.27	460.00	42500.0	
	Efluente	0.900	18.50	7.86	12.01	450.00	100.0	99.76
	Influente	0.910	18.40	7.79	12.10	460.00	54500.0	
	Influente	0.900	18.50	7.84	11.76	450.00	100.0	99.82
	Influente	0.900	18.50	7.80	12.20	440.00	50000.0	
	Efluente	0.900	18.60	7.86	12.00	440.00	100.0	99.80
	Influente	0.870	18.50	7.79	12.01	475.00	53000.0	
	Efluente	0.870	18.60	7.73	11.70	470.00	0.0	100.00
	Efluente	0.930	18.50	7.81	11.90	430.00	47000.0	
Efluente	0.930	18.60	7.85	11.60	430.00	0.0	100.00	
07 Feb 97	Influente	0.730	18.40	7.71	11.47	370.00	76000.0	
	Efluente	0.730	18.50	7.81	10.00	370.00	500.0	99.34
	Influente	0.620	18.40	7.22	11.00	310.00	78333.3	
	Efluente	0.610	18.50	7.40	9.87	310.00	600.0	99.23
	Influente	0.610	18.50	7.26	10.56	300.00	75000.0	
Efluente	0.610	18.60	7.47	9.50	300.00	433.3	99.42	
10 Feb 97	Influente	0.590	18.10	7.38	4.57	300.00	75333.3	
	Efluente	0.590	18.20	7.60	4.83	300.00	133.3	99.82
	Influente	0.600	18.10	7.30	4.53	310.00	60000.0	
	Efluente	0.600	18.20	7.60	4.31	310.00	100.0	99.83
	Influente	0.570	18.30	7.41	4.96	315.00	63000.0	
	Efluente	0.570	18.40	7.60	4.63	315.00	100.0	99.84
	Influente	0.570	18.30	7.44	4.82	350.00	65000.0	
Efluente	0.570	18.40	7.59	4.33	340.00	0.0	100.00	
11 Feb 97	Influente	0.640	17.80	7.38	3.53	330.00	55333.3	
	Efluente	0.640	17.90	7.54	2.53	320.00	100.0	99.82
	Influente	0.660	18.00	7.35	3.20	330.00	61500.0	
	Efluente	0.660	18.10	7.50	2.40	330.00	133.3	99.78
	Influente	0.580	18.40	7.39	2.80	350.00	58000.0	
Efluente	0.580	18.50	7.56	2.50	340.00	100.0	99.83	
13 Feb 97	Influente	0.690	17.70	7.58	5.95	350.00	73000.7	
	Efluente	0.680	17.80	7.74	5.29	340.00	166.7	99.77
	Influente	0.700	17.70	7.50	6.13	360.00	67500.0	
	Efluente	0.700	17.80	7.66	5.10	350.00	100.0	99.85
	Influente	0.730	18.10	7.60	6.33	340.00	70000.0	
	Efluente	0.730	18.20	7.74	5.29	340.00	133.3	99.81
	Influente	0.650	18.10	7.65	5.38	330.00	71000.0	
	Efluente	0.640	18.20	7.74	4.95	330.00	133.3	99.81
	Influente	0.690	18.40	7.54	5.55	310.00	69000.0	
Efluente	0.690	18.50	7.70	4.90	300.00	100.0	99.86	

**Tabla 5.5 b Resultados obtenidos de efluentes provenientes de los filtros de la planta de C.U.**

**Condiciones de desinfección:**

Desinfectante: Radiación Ultravioleta Tipo de agua: Residual  
 Flujo: 11.0 l/min Procedencia de la muestra: Filtros de C.U.  
 Tiempo de exposición: 2 min 30 s

Fecha de muestreo	Tipo de agua	Conduct. mS/cm	Temp. °C	pH	Turbiedad UTN	SDT mg/l	Coliformes fecales UFC/100 ml	% Remoción CF
17 Feb 97	Influente	0.610	17.10	7.33	6.46	310.00	49700.0	
	Efluente	0.610	17.20	7.58	6.38	310.00	133.3	99.73
	Influente	0.600	17.20	7.22	6.42	330.00	66000.0	
	Efluente	0.600	17.30	7.51	6.14	320.00	133.3	99.80
	Influente	0.630	17.20	7.38	6.55	290.00	47000.0	
	Efluente	0.630	17.30	7.60	6.42	280.00	100.0	99.79
	Influente	0.610	17.40	7.40	6.40	320.00	48300.0	
	Efluente	0.600	17.50	7.63	6.30	310.00	0.0	100.00
18 Feb 97	Influente	0.740	17.30	7.53	7.98	380.00	66500.0	
	Efluente	0.740	17.40	7.73	7.52	370.00	100.0	99.85
	Influente	0.750	17.40	7.44	7.79	370.00	63000.0	
	Efluente	0.750	17.50	7.69	7.61	370.00	100.0	99.84
	Influente	0.750	17.40	7.56	8.15	350.00	58000.0	
	Efluente	0.740	17.50	7.73	7.64	350.00	100.0	99.83
	Influente	0.760	17.60	7.58	8.01	355.00	60000.0	
	Efluente	0.760	17.70	7.76	7.88	350.00	0.0	100.00
19 Feb 97	Influente	0.730	17.60	7.60	7.99	360.00	70000.0	
	Efluente	0.720	17.40	7.75	7.32	360.00	0.0	100.00
	Influente	0.735	17.40	7.20	6.10	370.00	76500.0	
	Efluente	0.734	17.50	7.32	5.78	368.00	300.0	99.61
	Influente	0.740	18.50	7.58	6.37	371.00	79000.0	
	Efluente	0.737	18.60	7.73	5.89	370.00	500.0	99.37
	Influente	0.735	18.50	7.13	6.34	345.00	71500.0	
	Efluente	0.735	18.60	7.26	5.75	340.00	150.0	99.79
	Influente	0.750	18.50	7.22	6.00	356.00	70000.0	
	Efluente	0.7450	18.60	7.35	5.80	350.00	0.0	100.00