

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**DESINFECCIÓN DEL AGUA PARA USO HUMANO**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**CRISTIAN NIKOLAY JARAMILLO CAZCO**

**DIRECTOR: ING. MILTON SILVA**

**QUITO, MARZO 2010**

## **DECLARACIÓN**

Yo, Cristian Nikolay Jaramillo Cazco, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**Cristian Jaramillo**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Cristian Nikolay Jaramillo Cazco, bajo mi supervisión.

---

**Ing. Milton Silva Salazar**  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Dios de Israel por la inspiración brindada.

A la República del Ecuador por la oportunidad de educación gratuita

A la Escuela Politécnica Nacional por la calidad y mística impartida.

A la dirección acertada del Ing. Milton Silva

A la colaboración desinteresada del Ing. Luis Jaramillo.

A la perseverancia de mi padre.

A mi esposa por su ayuda idónea.

A la paciencia de mis hijos.

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi padre del Cielo Jehová de los Ejércitos, Jesucristo mi maestro y al Espíritu de paz, así como también, a mis padres de la Tierra Ramiro y Rosita, muy especialmente a mi hija Valentina.

## CONTENIDO

Resumen	XV
Presentación	XVII
CAPITULO 1: Generalidades	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	2
1.3 Objetivos	2
CAPITULO 2: Introducción	3
2.1 Planteamiento del problema	3
2.2 Calidad del agua	3
2.3 Enfermedades relacionadas con el uso del agua	5
CAPITULO 3: Estudio Bibliográfico	7
3.1 Teoría de la desinfección del agua	7
3.1.1 Eficiencia bacteriológica de los procesos de clarificación.	7
3.1.2 Remoción producida por la coagulación – floculación y sedimentación.	8
3.1.3 Remoción producida por la filtración.	10
3.1.4 Desinfección del agua.	12
3.1.5 Velocidad con que se realiza la desinfección	13
3.2 Factores que influyen en la desinfección	15
3.2.1 Relación concentración - tiempo.	15
3.2.2 Temperatura.	16
3.2.3 Potencial hidrógeno - pH.	17
3.2.4 Modos de desinfección del agua.	17
3.3 Desinfectantes físicos	18
3.3.1 Rayos ultravioletas.	18
3.3.1.1 Los factores que afectan la radiación UV	21
3.3.1.2 Ventajas	22
3.3.1.3 Subproductos de la Desinfección	23
3.3.2 Calor.	24
3.3.3 Desinfección con radiación solar.	24

3.3.4 Desinfección con calor solar.	25
3.3.5 Método SODIS	25
3.3.5.1 Resultados Obtenidos	26
3.3.5.2 Botellas a utilizar	27
3.4 Desinfectantes químicos	28
3.4.1 El cloro.	28
3.4.1.1 Propiedades y química del cloro	28
3.4.1.2 Reacciones del cloro en el agua.	31
1. Reacciones hidrolíticas.	31
2. Reacciones de oxidación - reducción.	35
3. Reacciones del cloro con el nitrógeno amoniacal.	36
4. Reacciones del cloro con la materia orgánica y otros compuestos químicos.	39
5. Reacciones del cloro con compuestos orgánicos	43
3.4.1.3 Interferencias en la cloración.	43
a. Turbiedad.	43
b. Nematodos.	43
c. Temperatura	43
d. Calcio.	44
e. Potencial hidrógeno	44
f. Fenoles.	44
3.4.1.4 El fenómeno del punto de quiebre	45
3.4.1.5 Cloración sobre el punto de quiebre.	48
3.4.2 Bióxido de cloro.	49
3.4.3 Cloro gaseoso.	50
3.4.4 Compuestos de hipoclorito.	51
3.4.5 Producción en la planta. (Electrólisis)	53
3.5 Otros desinfectantes químicos.	56
3.5.1 Yodo	56
a. Desinfección con tintura de yodo en Aguas claras.	58
b. Desinfección con tintura de yodo en Aguas turbias.	59
3.5.2 Bromo.	59
3.5.3 Nitrato de Plata.	61
3.5.4 Plata ionizada.	63

3.5.5 Ozono.	66
1. Propiedades del Ozono	66
2. Producción natural del ozono	68
3. Formación artificial del ozono	69
4. Formas de actuación	69
5. Tipos de ozonizadores	74
6. Incorporación del ozono al agua	76
7. Influencia del pH y de la temperatura	77
8. Acción sobre el plancton	77
9. Puesta en contacto	77
3.6 Situaciones de emergencia	78
3.6.1 Introducción y Generalidades.	78
3.6.1.1 La condición física del agua.	79
3.6.1.2 Selección del método para desinfectar	80
3.6.1.3 Resumen e ilustración de los puntos dominantes	81
3.6.2 Cloración durante un desastre	83
CAPITULO 4: Estudio Comparativo	86
4.1 De la actividad germicida de los desinfectantes	86
4.1.1 Recrecimiento de bacterias en las tuberías.	87
4.1.2 Ozono.	87
4.1.2.1 Ozono Versus Compuestos Clorados	88
4.1.3 Ozono y Cloro	90
4.1.4 Ozono y Generadores de Cloro	90
4.1.5 Ozono y Dispensadores de Cloro	90
4.1.6 Ozono y Cloro Líquido Alimentado a Mano	90
4.1.7 Ozono y Bromo	91
4.1.8 Ozono y Tabletas de Bromo	91
4.1.9 Ozono y Bromuro de Sodio	91
4.1.10 Ozono y Ionizador Catalítico	92
4.1.11 Ozono y Dióxido de Cloro.	92
4.1.12 Ozono y Ultravioleta.	93
4.1.13 Cloro Gas y el Hipoclorito de Calcio.	94
4.1.14 Electrolisis In Situ y el Hipoclorito de Calcio.	94
4.1.15 Bromo, Yodo y el Dicloro Isocianurato.	95



4.1.16 Ozono y SODIS.	96
4.2 Estudio Comparativo de costos	96
4.2.1 Costos y Facilidad de Aplicación	98
1. Tabletas de Hipoclorito de Calcio	98
2. Cloro obtenido a través de sal por medio de tecnología electrónica	99
3. Plantas Generadoras de luz Ultravioleta	100
4. Criterios de desinfección del agua con ozono	102
4.2.2 Costos de tratamiento de agua en caso de emergencia.	104
4.3 Comparación de su aplicabilidad en sistemas convencionales	107
4.3.1 Análisis de las formas de Aplicación en Nuestro Medio	108
CAPITULO 5: Conclusiones y Recomendaciones	111
5.1 Bibliografía	114
5.2 Anexos	118

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3-1: Ley de Chick	13
Ecuación 3-2: Tiempo de Exposición para reducir de $n_0$ a $n$	14
Ecuación 3-3: Ley de Watson	15
Ecuación 3-4: Constante de la desinfección K	16
Ecuación 3-5: El Cloro	29
Ecuación 3-6: Producción de Hidróxido de Sodio	29
Ecuación 3-7: Producción de Cloro	29
Ecuación 3-8: Hidrólisis del Cloro	31
Ecuación 3-9: Reacción del Ácido Hipocloroso	31
Ecuación 3-10: Constante de Ionización $K_a$	31
Ecuación 3-11: Cloro Libre Total Ct	32
Ecuación 3-12: Cloro Libre Total Función de $K_a$	32
Ecuación 3-13: pH	32
Ecuación 3-14: Ácido Hipocloroso en función de Ct y $K_a$	32
Ecuación 3-15: Hipoclorito de Calcio	34
Ecuación 3-16: Hipoclorito de Sodio	34
Ecuación 3-17: Reacción del Hipoclorito de Calcio	35
Ecuación 3-18: Reacción del Hipoclorito de Sodio	35
Ecuación 3-19: Formación de la Monocloramina	37
Ecuación 3-20: Formación de la Dicloramina	37
Ecuación 3-21: Formación de la Tricloramina	37
Ecuación 3-22: Reacción del Cloro con los Aminoácidos	40
Ecuación 3-23: Reacción del Cloro con los Fenoles	40
Ecuación 3-24: Reacción del Cloro con los Precursores	41
Ecuación 3-25: Reacción del Cloro con el Ácido Sulfhídrico	42
Ecuación 3-26: Reacción del Cloro con el Hierro	42
Ecuación 3-27: Reacción del Cloro con el Manganeseo	42
Ecuación 3- 28: Reacciones de destrucción cloraminas	47
Ecuación 3- 29: Reacción sobre el punto de quiebre	48
Ecuación 3-30: Reacción del Bióxido de Cloro	49
Ecuación 3-31: Reacción del yodo	57
Ecuación 3-32: Constante del Ácido Hipoyodoso	57
Ecuación 3-33: Reacción del ácido Hipobromoso	60

Ecuación 3-34: Reacción del ozono	66
Ecuación 3-35: Coeficiente de equilibrio K	67
Ecuación 3-36: Coeficiente de destrucción a	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Muertes debido a tifoidea	6
Figura 3-1: Tamaños de microfóculos, bacterias y virus	8
Figura 3-2: Porcentaje de remoción de bacterias	9
Figura 3-3: Remoción de virus T4	10
Figura 3-4: Rata de filtración en la remoción de virus de polio	11
Figura 3-5: Remoción de virus en filtros de arena	12
Figura 3-6: Ley de Chick	14
Figura 3-7: K en función del pH	16
Figura 3-8: Lámparas para desinfección UV	18
Figura 3-9: Esquema de un generador de luz UV	20
Figura 3-10: Planta de tratamiento con luz UV	23
Figura 3-11: Efecto desinfectante de la luz solar	26
Figura 3-12: Método SODIS	27
Figura 3-13: pH vs %HOCl y %OCl <sup>-</sup>	33
Figura 3-14: pH vs Cloro Molecular Gaseoso	34
Figura 3-15: Átomo de Cloro	36
Figura 3-16: pH vs. Mono y Dicloraminas	38
Figura 3-17: Crecimiento de los trihalometanos (THMs)	41
Figura 3- 18: EL Clorofenol	45
Figura 3-19: Punto de Quiebre	46
Figura 3-20: La Monocloramina	47
Figura 3-21: Cloración sobre el punto de quiebre	48
Figura 3-22: Generador de ClO <sub>2</sub>	50
Figura 3-23: Esquema de una celda de Diafragma	54
Figura 3-24: Generación de cloro por electrólisis	55
Figura 3-25: % HOI vs. %I <sub>2</sub>	57
Figura 3-26: Desinfección del yodo	58
Figura 3-27: Generador de plata coloidal	64
Figura 3-28: Diagrama esquemático de un generador de ozono	71
Figura 3-29: Esquema de un generador de ozono	73
Figura 3-30: Instalación de ozonización	75
Figura 3-31: Coeficiente de reparto	77

Figura 3-32: Filtración de agua turbia	81
Figura 3-33: Hervir el agua	82
Figura 3-34: Aireación del agua	82
Figura 3-35: Uso de Cloro y Yodo	82
Figura 3-36: Uso de hipoclorito de sodio	83
Figura 3-37: Uso de tintura de yodo	83
Figura 3-38: Filtración de agua turbia	83
Figura 4-1: Clorador Aquaward	99
Figura 4-2: Clorador Sanilec 6	100
Figura 4-3: Ozonizador	103

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Valores de K	15
Tabla 3-2: Propiedades del Cloro	28
Tabla 3-3: Propiedades físicas de Cloro	29
Tabla 3-4: Propiedades del Cloro y sus derivados	30
Tabla 3-5: Valor de la constante Ka	31
Tabla 3-6: Reacciones de cloro en el agua	36
Tabla 3-7: Desinfección de diferentes formas de Cloro	39
Tabla 3-8: Tabletas de Hipoclorito de Calcio	52
Tabla 3-9: Comparación de requerimientos de Energía	55
Tabla 3-10: Producción de Cloro por Electrolisis	56
Tabla 3-11: Propiedades del yodo	56
Tabla 3-12: Propiedades del Bromo	59
Tabla 3-13: Propiedades del Nitrato de Plata	61
Tabla 3-14: Propiedades de la Plata	63
Tabla 3-15: Propiedades del Ozono	66
Tabla 3-16: Dosis de cloro para desinfección de agua	80
Tabla 3-17: Sustancias usadas para la cloración	84
Tabla 4-1: Actividad germicida de los desinfectantes químicos.	86
Tabla 4-2: Acción bactericida O <sub>3</sub> vs. Cl <sub>2</sub>	88
Tabla 4-3: Comparación O <sub>3</sub> vs. Cl <sub>2</sub>	89
Tabla 4-4: Concentraciones de Desinfectante	89
Tabla 4-5: Costos Comerciales de Desinfectantes	98
Tabla 4-6: Demanda De Cloro para Aguas Claras	105
Tabla 4-7: Demanda De Cloro para Aguas Turbias	105
Tabla 4-8: Demanda De Yodo para Aguas Claras	105
Tabla 4-9: Demanda De Yodo para Aguas Turbias	105
Tabla 4-10: Costos Desinfección para Aguas Claras	106
Tabla 4-11: Costos Desinfección para Aguas Turbias	106
Tabla 4-12: Costos Comparativos	107
Tabla 4-13: Requerimientos de Energía y Sales	108

## **RESUMEN**

En la presente investigación se ha realizado el estudio de la desinfección del agua para uso humano, los diferentes tipos de desinfectantes y sus diferentes formas de aplicación.

Se inicio con la revisión bibliográfica de este proceso, donde se encontraron nuevas tecnologías útiles para los países en vías de desarrollo, como el nuestro, las mismas que reducen la inversión inicial o simplifican las labores operativas y de mantenimiento, sin desmedro de la calidad del agua producida, luego de lo cual se procedió a realizar un estudio comparativo.

Mediante el análisis comparativo de la actividad germicida y de costos de los diferentes desinfectantes, se logra determinar la aplicabilidad real para nuestro medio y para situaciones de emergencia.

Sin entrar en detalles y análisis del funcionamiento de las plantas de tratamiento de agua, manteniendo los procedimientos convencionales o simplificados dependiendo de la calidad del agua cruda se presentan conclusiones y recomendaciones al respecto.

## **SUMMARY**

In this research has been the study of the disinfection of water for human use, the different types of disinfectants and its different forms of application.

Start with the literature review of this process, where they found useful for countries technologies developing, like ours, they reduce the initial investment or simplify the operational work and maintenance without detriment to the quality of the produced water, then proceeded to carry out a comparative study.

Through The comparative analysis of germicidal activity and costs of different disinfectants, achieved determine the real applicability to our environment and for emergency situations.

Without going into details and analysis of the operation of water treatment plants, keeping the conventional or simplified procedures depending on the quality of raw water are conclusions and recommendations thereon.



## PRESENTACIÓN

El objetivo principal de la tesis es determinar el correcto uso de los distintos desinfectantes y su aplicación para nuestro medio y en caso de emergencia.

Se ha realizado el estudio de la calidad del proceso de desinfección del agua para lo cual se hizo primeramente una revisión bibliográfica sobre las diferentes formas y tipos de desinfectantes, y su aplicabilidad real en situaciones convencionales y de emergencia.

Para el desarrollo del tema señalado, se han propuesto cinco capítulos.

El capítulo 1, corresponde a las generalidades, antecedentes, justificación y objetivos de esta investigación.

El capítulo 2, corresponde a la introducción, planteamiento del problema, calidad del agua y las enfermedades relacionadas con el uso del agua.

En el capítulo 3, se realiza una revisión bibliográfica de la teoría de la desinfección y los factores que influyen en ella. Determinación de la actividad germicida de los desinfectantes, tipos de desinfectantes y diferentes formas de desinfección.

En el capítulo 4, se elabora un estudio comparativo de:

- Las diferentes formas y tipos de desinfectantes, y su aplicabilidad real en el proceso de desinfección del agua para uso humano y se documenta los resultados obtenidos disponibles.
- Costos en la implementación y utilización de los diferentes desinfectantes.
- Aplicabilidad que tienen los distintos desinfectantes en sistemas convencionales.
- Factibilidad de usarse los diferentes desinfectantes en situaciones de emergencia.

Finalmente en el capítulo 5, se definen los resultados principales que llevaron a las conclusiones y recomendaciones, que servirán para realizar estudios posteriores, en los cuales se podrá variar las condiciones de realización o la combinación y uso de otras tecnologías será posible proporcionar una respuesta clara del método y sistema de desinfección para uso humano que más se ajuste, a nuestro medio en un sistema convencional o para situaciones de emergencia.

# **CAPITULO 1**

## **GENERALIDADES**

### **1.1 ANTECEDENTES**

La relación existente entre la calidad del agua y la salud se conoce desde siempre. Las aguas claras se consideraban aguas limpias mientras los pantanos eran considerados zonas sucias y aguas no salobres.

La desinfección se ha utilizado durante muchos siglos. Sin embargo los mecanismos de desinfección no son conocidos hasta hace unos pocos cientos de años.

En 1854 la epidemia de cólera causó gran cantidad de muertos en Londres. John Snow, un Doctor inglés, descubrió que la epidemia del cólera era causada por el bombeo de agua contaminada. La expansión del cólera se evito mediante el cierre de todos los sistemas de bombeo.

Después de este hecho los científicos han realizado estudios e investigación de la presencia de microorganismos en el agua y modo de eliminación para el suministro de agua apta para el consumo.

En el siglo XIX se descubrieron los efectos de los desinfectantes en el agua para el tratamiento y desinfección de la misma. Desde 1900 los desinfectantes se utilizan extensamente por las compañías del agua para evitar la expansión de enfermedades y mejor la calidad del agua.

La existencia de los estándares de calidad establecen límites permisibles para los parámetros físicos químicos del agua en función de sus mejores usos, esto es como fuente de abastecimiento de agua cruda, fuente de bebedero de

ganado, riego, preservación de flora y fauna, recreación, etc. asumiendo que el agua es un bien capital.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

La información existente acerca de la predicción del método de desinfección más apropiado para nuestro medio y en situaciones de emergencia es escasa. La mayoría de las publicaciones hacen referencia a resultados de tipo cualitativo o dentro de un rango determinado para condiciones de laboratorio, lo cual permite hacer predicciones de tipo muy general. Es por esto que se desea determinar una comparación económica y técnica que caracterice cuantitativamente este proceso bajo condiciones previamente seleccionadas.

Con el planteamiento de la comparación mencionada, bajo las condiciones propuestas, será posible proporcionar una respuesta clara del método y sistema de desinfección del agua para uso humano que se ajuste, a nuestro medio en un sistema convencional y para situaciones de emergencia.

## **1.3 OBJETIVOS.**

- Realización de un estudio bibliográfico sobre las diferentes formas y tipos de desinfectantes, y su aplicabilidad real en situaciones convencionales y de emergencia.
- Determinación bibliográfica de la actividad germicida de los desinfectantes, tipos de desinfectantes y diferentes formas de desinfección.
- Estudio comparativo de costos en la implementación y utilización de los diferentes desinfectantes.
- Estudio comparativo de la aplicabilidad en sistemas convencionales que tienen los distintos desinfectantes.
- Estudio comparativo de la factibilidad de usarse los diferentes desinfectantes en situaciones de emergencia.

## **CAPITULO 2**

### **INTRODUCCIÓN**

#### **2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La desinfección del agua se refiere a la destrucción de los organismos causantes de enfermedades ó patógenos presentes en ellas. Pueden ser considerados como procesos preparatorios para la desinfección, aquellos que cumplen dos objetivos básicos: Disminuyen la carga bacteriana; y, hacen más eficiente los métodos de desinfección.

Debe considerarse que los microorganismos son partículas coloidales y que como tales quedan sometidos a los mismos procesos de remoción que efectúan a los otros coloides. Los virus, a pesar de su pequeña dimensión, son también coloides cuyo tamaño varía de 1 a 1000  $\mu\text{m}$ , y por tanto están sometidos a las fuerzas electrostáticas y demás fenómenos asociados al proceso de coagulación.

#### **2.2 CALIDAD DEL AGUA**

El agua cruda, que se encuentra en la naturaleza, no ha recibido ningún tratamiento para modificar sus características físicas, químicas y radiológicas, biológicas y microbiológicas; y que requiera tratamientos especiales para hacerla potable. La contaminación encontrada en el agua cruda es de origen natural causada por fenómenos propios de la cuenca o acuífero.

El término calidad del agua es una expresión de empleo muy generalizado cuyo espectro es de significado muy amplio. Como las características deseables de un agua cualquiera varían según la utilización a la que quiera

destinársela, el interés en el agua implica sus aplicaciones comerciales, industriales, recreativas, etc.

Todos los empleos de agua deben subordinarse a la necesidad del hombre de disponer de un fluido sano para su consumo. El agua destinada a la bebida y a la preparación de alimentos debe estar exenta de organismos capaces de provocar enfermedades o cualquier mineral y sustancia orgánica que pueda producir efectos fisiológicos perjudiciales. Para fomentar el consumo de este líquido, el agua debe ser aceptable desde el punto de vista estético (debería estar exenta de turbiedad, olor y color perceptibles), así como de cualquier sabor desagradable. El agua de bebida debe tener también una temperatura razonable. Esta agua recibe la denominación de potable, lo que significa que puede consumirse en cualquier cantidad sin provocar efectos perjudiciales sobre la salud.

El agua potable, es el agua destinada para el consumo humano, debe estar exenta de organismos capaces de provocar enfermedades y de elementos o sustancias que pueden producir efectos fisiológicos perjudiciales, y debe cumplir con los requisitos de las normas de calidad física, química, bacteriológica y radiológica del agua.

La calidad del agua va adquiriendo un significado cada vez mayor, y el hombre deberá determinar con mayor precisión aquellos parámetros que, en su mayor parte, han sido puramente subjetivos durante el proceso de desarrollo de nuestra sociedad.

Al echar una mirada retrospectiva, parece obvio que el proceso tendiente a la mejora de la salud y el bienestar de la especie humana tan solo pudo lograrse recurriendo a un mejor control de sus circunstancias ambientales<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Borchardt J.A. y Walton G, (1991), Calidad del Agua, New York,

## **2.3 ENFERMEDADES RELACIONADAS CON EL USO DEL AGUA**

En los países en vías de desarrollo normalmente no hay suficiente agua limpia o sistemas de colección y tratamiento de aguas residuales. Una gran parte de la población de estos países muere o enferma a causa de patógenos existentes en el agua que beben. El mayor impacto se genera en grupos más vulnerables como los niños, personas mayores o parte de la población con un sistema inmunológico débil (ej. pacientes de SIDA o sometidos a trasplantes de órganos).

Las bacterias patógenas que causan ciertas enfermedades pueden sobrevivir al caer en el agua y ser transportadas, usando el agua como vehículo, de una persona a otra. Entre las llamadas enfermedades de origen hídrico esta la fiebre tifoidea, la disentería, el cólera y algunos tipos de padecimientos diarreicos conocidos como gastroenteritis.

Las principales enfermedades hídricas se presentan en la zona tórrida, la fiebre tifoidea y el cólera, son dos infecciones muy características, que cobran su temible tributo de enfermedad y muerte en las ciudades Sudamericanas costeras del Pacífico y en la antigüedad en aquellas que surgieron de la revolución industrial. La salmonelosis (paratifoidea) y la disentería bacilar (shigelosis) son grupos de enfermedades hídricas mucho menos devastadoras en sus efectos que la tifoidea y el cólera; la tularemia, enfermedad de Weil y la diarrea hemorrágica, son enfermedades hídricas sólo en el sentido adventicio.

Las enfermedades infecciosas intestinales revelan una tendencia ascendente, las diarreas son las que mayor peso tienen (alrededor del 45%) tienen un total de enfermedades sujetas a vigilancia epidemiológica y prevalecen entre la población menor de cinco años. Como quiera que las bacterias estén distribuidas tan profundamente en la naturaleza y las hay en el agua, tiene fundamental importancia para comprender los procesos del tratamiento de aguas. El agua puede contener muchos tipos de bacterias saprofitas que

arrastre el suelo; también puede contener tipos parasitarios que se descargan en el agua con los desperdicios de la vida animal, debido a la costumbre del hombre de disponer los desperdicios arrojándolos a la corriente de agua más cercana.

Las técnicas de purificación del agua se han desarrollado extensamente durante el pasado siglo. La desinfección del agua destinada al consumo humano ha significado una reducción en el número de enfermedades transmitidas por el agua, como son el cólera y tifoidea.

Una publicación de la Organización Mundial de la Salud señala que cada 24 horas pueden morir 13000 niños de menos de un año de edad debido principalmente a las enfermedades de las que el agua es portadora. En la figura 2-1 apreciamos la reducción del número de muertes debido al tifoideo en EE.UU. (1900-1920), comparado con el número de personas que usan agua tratada<sup>2</sup>

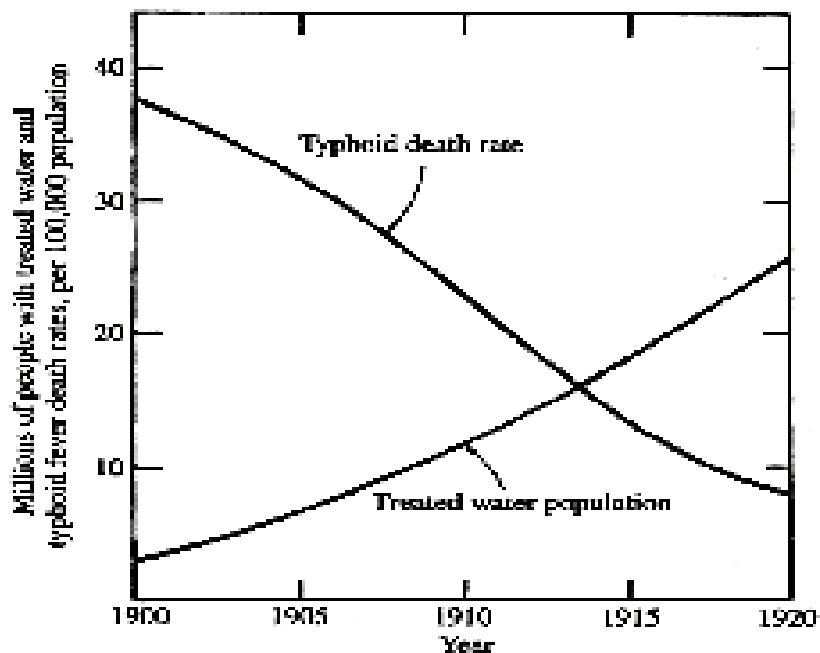


Figura 2-1: Muertes debido a tifoidea

Fuente: Lenntech (2009)

<sup>2</sup> Lenntech (2009). Producción de Agua Potable - Desinfección. Holanda. <http://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/introduccion/introduccion-desinfeccion-agua.htm>



## **CAPITULO 3**

### **ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO**

#### **3.1 TEORÍA DE LA DESINFECCIÓN DEL AGUA**

La desinfección de los sistemas de abastecimiento de agua potable, se lleva a cabo casi universalmente mediante el uso de gas cloro o compuestos de cloro. Su capacidad para eliminar organismos patógenos y mantener una concentración residual en el sistema de distribución, así como también su amplia disponibilidad y costo moderado en la mayoría de las regiones del mundo, los hace adecuados para la desinfección.

En la actualidad, la única opción viable, en vez de la cloración para la desinfección de los suministros de aguas comunales, es la ozonización, la cual se utiliza cada vez más en los sistemas europeos de abastecimiento. Sin embargo, el uso de ozono generalmente no se recomienda para los países en desarrollo, debido a los altos costos de instalación, operación y mantenimiento, la necesidad de un suministro continuo de energía y la necesidad de importación del equipo y refacciones.

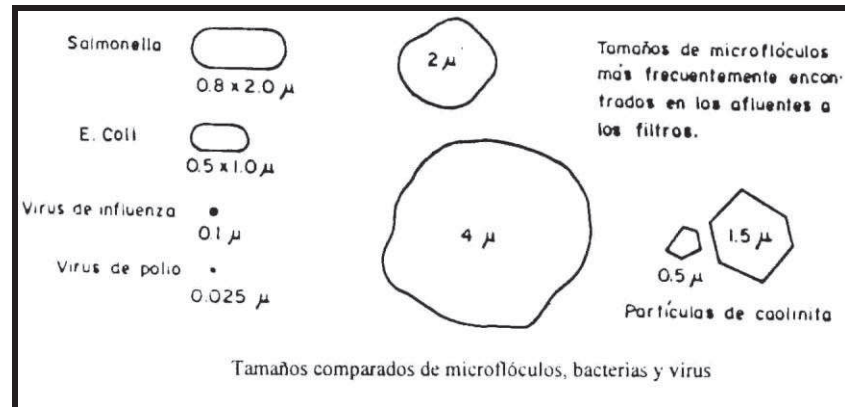
##### **3.1.1 EFICIENCIA BACTERIOLÓGICA DE LOS PROCESOS DE CLARIFICACIÓN.**

De los procesos de mezcla, coagulación, sedimentación y filtración remueven, con mayor o menor eficiencia, la mayoría de las bacterias y virus presentes en el agua.

Desde este punto de vista pueden ser considerados como procesos preparatorios para la desinfección, pues cumplen dos objetivos:

- a. Disminuyen la carga bacteriana del agua.
- b. Hacen más eficientes los métodos de desinfección.

Debe considerarse que los microorganismos son partículas coloidales y que como tales quedan sometidos a los mismos procesos de remoción que afectan a los otros coloides (Ver figura 3-1). Durante el proceso de filtración su eliminación se debe probablemente más a los mecanismos de difusión que a los gravitacionales.<sup>3</sup>



**Figura 3-1: Tamaños de microfóculos, bacterias y virus**

**Fuente: Jorge Arboleda Valencia (1992)**

### 3.1.2 REMOCIÓN PRODUCIDA POR LA COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN Y SEDIMENTACIÓN.

Sastry y sus colaboradores (1969)<sup>4</sup> suministran datos donde los procesos de coagulación - floculación - sedimentación son altamente eficientes para la remoción de bacterias vegetativas en filtros lentos (ver figura 3-2). En ellas se ve que la remoción de bacterias es directamente proporcional a la remoción de turbiedad y que se pueden lograr remociones de hasta 99.7% cuando se obtiene una eficiencia muy alta en el proceso de coagulación y sedimentación. Resultados similares se han obtenido con aguas sembradas con virus. Robeck y colaboradores (1962)<sup>5</sup> encontraron que al incrementar la dosis de sulfato de aluminio y dejar sedimentar, se podía obtener remociones de virus de hasta el

<sup>3</sup> Arboleda J. (1992), Teoría y Práctica De La Purificación del agua, Bogotá, Ed.Acodal,

<sup>4</sup> Sastry, C.A., Aboo, K.M, Kare, G.K... & Rao, M.N., (1969) Removal of bacteria from water by coagulation. Environmental Health. India,

<sup>5</sup> Robeck, G.G., Charke, N.A& Dostal, K.A., (Oct. 1962) "Effectiveness of water treatment processes in virus removal". J. AWWA, 54:1275,

99%. Chandhuri y Engelbrecht (1970)<sup>6</sup> demostraron que la coagulación con  $Al_2(SO_4)_3$  y sedimentación removía el 98% al 99.9% de los colifagos T4 y MS2 presentes en el agua (ver figura 3-3).

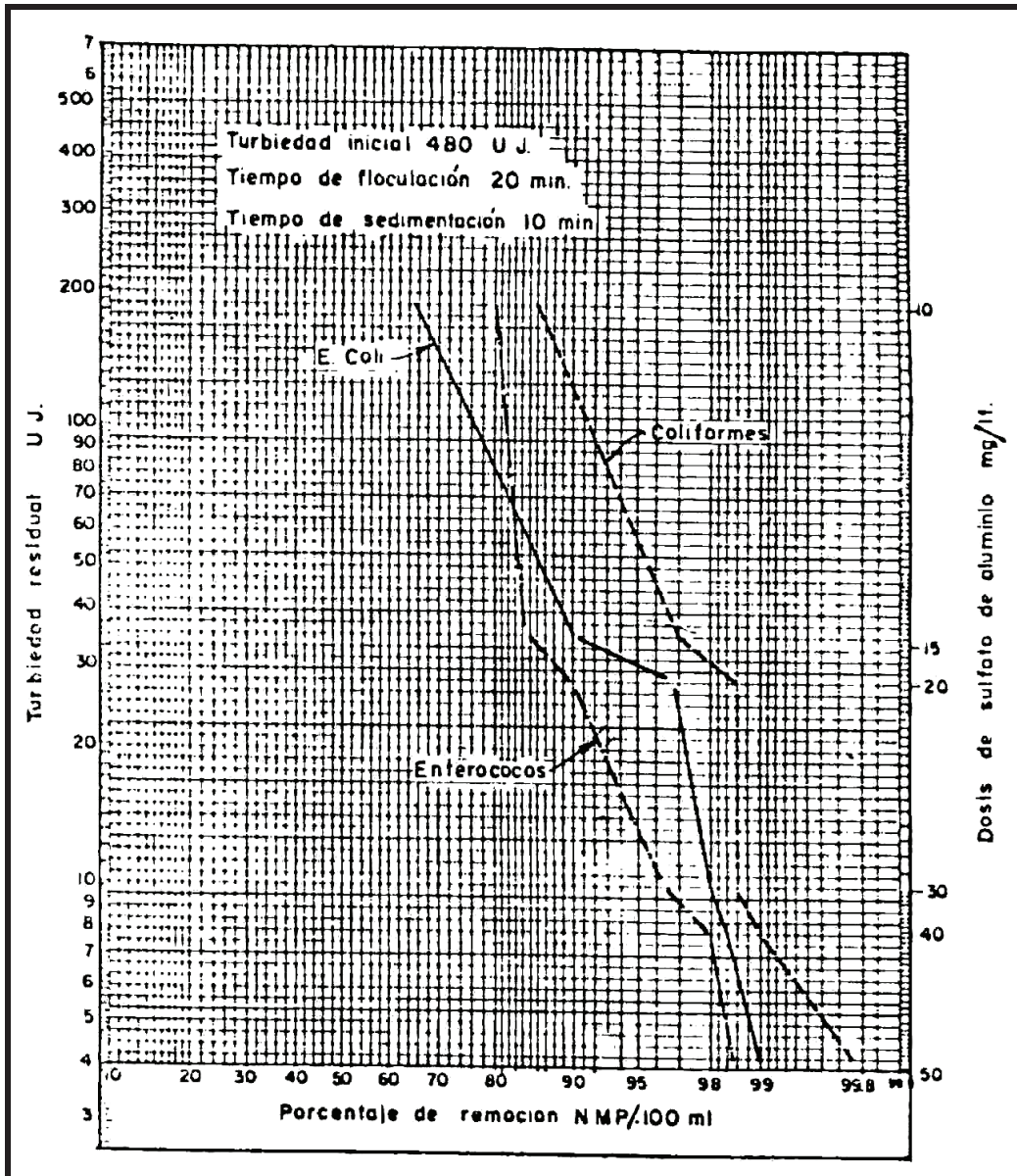


Figura 3-2: Porcentaje de remoción de bacterias

Fuentes: Sastry, C.A., Aboo, K.M, Kare, G.K. & Rao, M.N., (1969)

La presencia de Mg (quizás por la formación de  $Mg(OH)_2$ ) mejora notablemente la eficiencia. Carlson y sus colaboradores (1968)<sup>7</sup> han encontrado que las partículas de arcilla absorben los virus con bastante rapidez.

<sup>6</sup> Chaudhuri, M. & Engelbrecht, R.S., (Sept. 1970). "Removal of viruses from water by chemical coagulation and removability". *J. AWWA*, 62:563

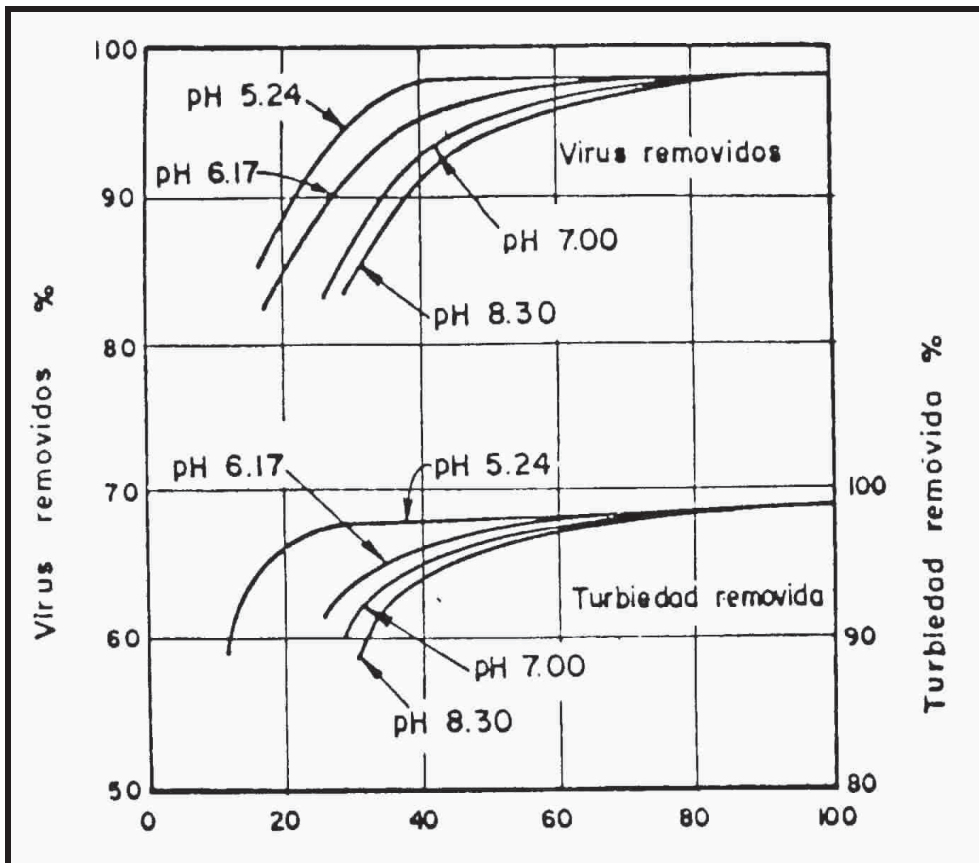


Figura 3-3: Remoción de virus T4

Fuente: Chauduri, M. & Engelbrecht, R.S., (Sept. 1970).

La inactivación de los mismos ocurre aparentemente en dos etapas:

- La primera corresponde a la formación de un complejo de virus e iones de aluminio; y,
- La segunda a la aglutinación y sedimentación de floculo.

### 3.1.3 REMOCIÓN PRODUCIDA POR LA FILTRACIÓN.

Estudios del mismo tipo, hechos sobre la filtración, han demostrado que si esta no va precedida de coagulación, aún cuando se use arena fina (0.28 mm) y bajas ratas (60 a 120 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día). Se remueve sólo una pequeña proporción de

<sup>7</sup> Carlson G.F., Jr.; Woodard, F.E.; Wentworth, D.F. & Sproul, O.J., "Virus inactivation on clay particles in natural waters". J. WPCF, 40: R89, (Feb. 1968).

los virus presentes en el agua (menos de 20%) (Véase figura 3-4)<sup>8</sup>. En cambio, cuando se inyecta una dosis adecuada de sulfato de aluminio en el afluente del filtro, se obtienen remociones hasta el 98% de los virus, aún cuando se trabaje con tasas de filtración altas de 340 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día y medios de arena y antracita.

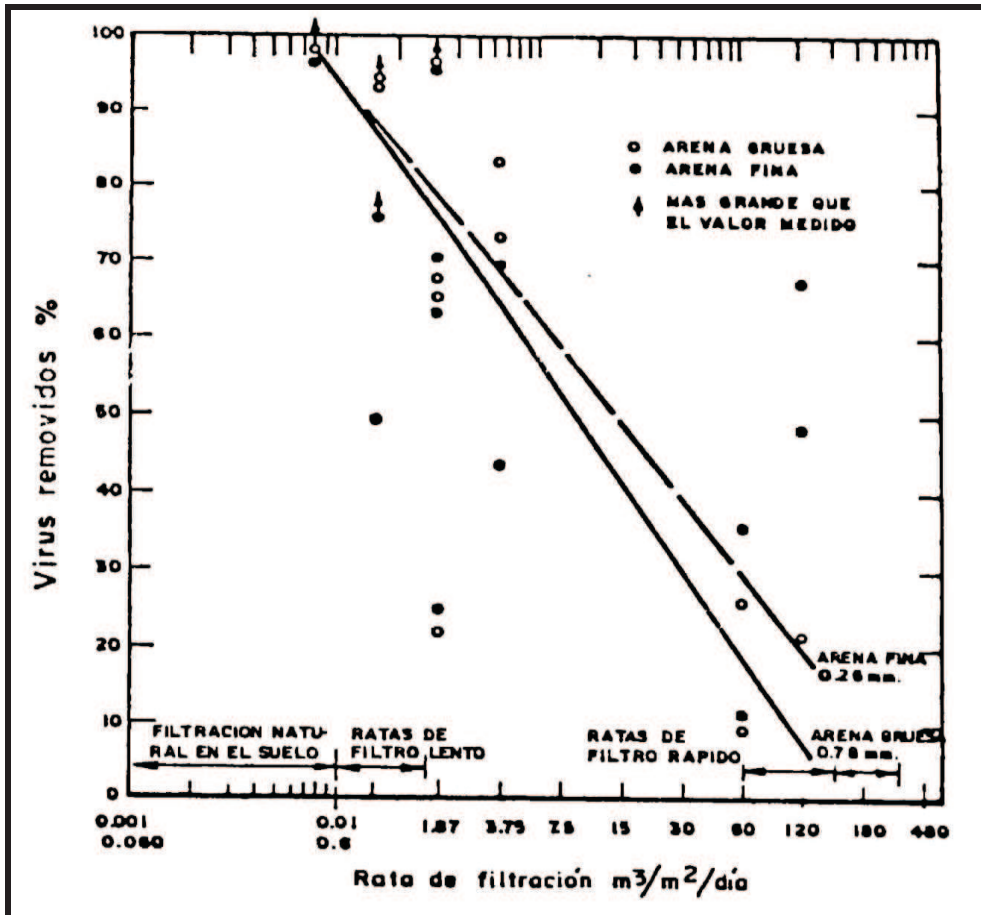


Figura 3-4: Rata de filtración en la remoción de virus de polio

Figura 3-4: Berg, G., (Jul. 1966).

Toda irrupción de turbiedad va usualmente acompañada de un incremento en la penetración de los virus, como lo muestra la figura 3-5, tomada de los trabajos de Robeck, Clarke y Dostal (1962)<sup>9</sup>. En ella se ve que cuando la turbiedad del filtrado aumentó de 0.1 UNT a más de 2.0 UNT, el paso del virus

<sup>8</sup> Berg, G., (Jul. 1966). "Virus transmission by de water vehicle". Removal of viruses by water treatment procedures. Health Lab. Science, 3: 170,

<sup>9</sup> Robeck, G.G., Charke, N.A& Dostal, K.A., (Oct. 1962) "Effectiveness of water treatment processes in virus removal". J. AWWA, 54:1275,

subió de 0 a 12%. El ayudante de filtración retardó la irrupción de turbiedad, pero en cuanto esta se produjo, la penetración de los virus se produjo también.

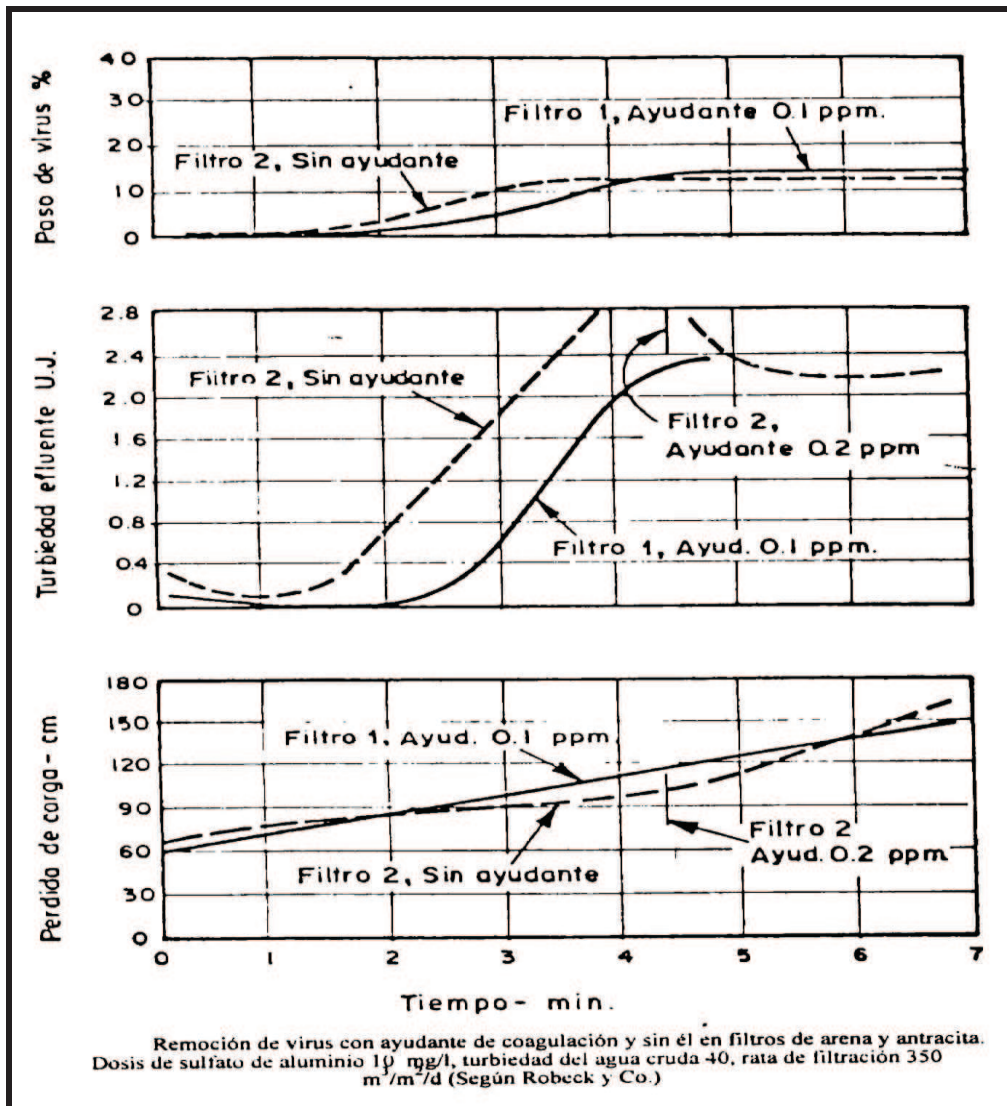


Figura 3-5: Remoción de virus en filtros de arena

Fuentes: Robeck, G.G., Charke, N.A. & Dostal, K.A., (1962)

### 3.1.4 DESINFECCIÓN DEL AGUA.

La desinfección del agua se refiere a la destrucción de los organismos causantes de enfermedades o patógenos presentes en ella. Las condiciones que debe tener un desinfectante ideal para poder ser usado en las plantas de purificación son:

- a. Debe ser capaz de destruir los organismos causantes de enfermedades.

- b. Debe realizar esta labor a la temperatura del lugar y en un tiempo adecuado.
- c. No debe hacer al agua tóxica peligrosa para la salud o de sabor desagradable.
- d. Debe ser de fácil obtención, sencillo manejo y bajo costo.
- e. Su concentración en el agua debe poderse determinar prontamente.
- f. Debe dejar un efecto residual, para que proteja el agua contra posteriores contaminaciones.

La efectividad de un proceso de desinfección se mide por el porcentaje de organismos muertos dentro de un tiempo, una temperatura y un pH prefijados. La resistencia de estos microorganismos varia, sin embargo, según sus características morfológicas<sup>10</sup>.

### **3.1.5 VELOCIDAD CON QUE SE REALIZA LA DESINFECCIÓN**

El progreso de desinfección del agua no es instantáneo sino que se realiza progresivamente, con más o menos velocidad a través del tiempo y se considera terminado cuando el 100% (99.99%) de los organismos que se trata de destruir han muerto. La forma como este proceso se realiza puede describirse matemáticamente, considerando que se trata de una reacción de primer orden y que por tanto el número de organismos destruidos en la unidad de tiempo es proporcional al número de organismos remanentes en el tiempo t.

En otras palabras, si n es el número de organismos y K la velocidad de la reacción:

$$- dn / dt = Kn$$

#### **Ecuación 3-1: Ley de Chick**

**Fuente: Jorge Arboleda Valencia (1992)**

Esta es le llamada ley de Chick. Integrando el primer término de esta expresión entre n<sub>0</sub> (número de organismos en el tiempo t = 0) y n (número de organismos en el tiempo t=t) y el segundo término, entre t =0 y t =t, obtenemos:

---

<sup>10</sup> Jorge Arboleda V, (1992) Teoría y Práctica De La Purificación del agua, Bogota, Ed.Acodal,

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = -k \int_0^t dt$$

$$\log n - \log n_0 = -kt$$

$$n/n_0 = e^{(-kt)}$$

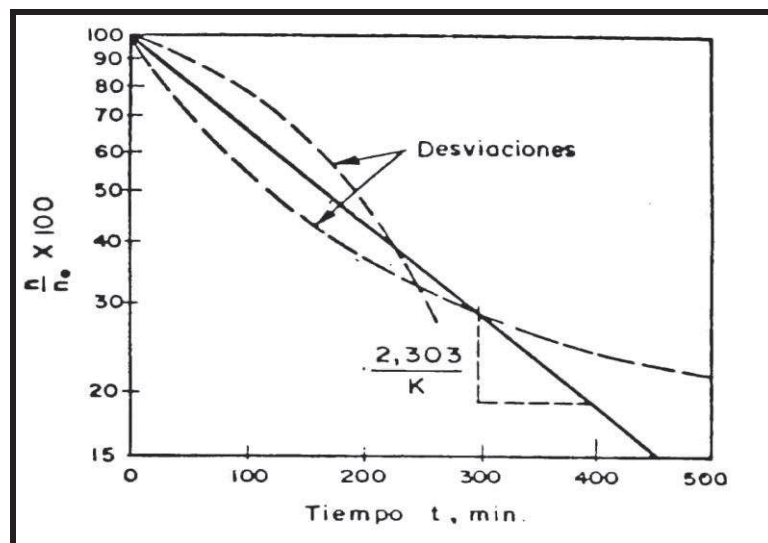
Tomando logaritmos en la expresión:

$$T = 1/k \ln(n_0/n)$$

**Ecuación 3-2: Tiempo de Exposición para reducir de  $n_0$  a  $n$**

**Fuente: Jorge Arboleda Valencia (1992)**

En consecuencia, obtendremos una línea recta en los casos en que se cumple la Ley de Chick, como lo muestra la figura 3-6. Sin embargo, no siempre el proceso de destrucción de microorganismos es una reacción de primer orden, y por tanto se presentan frecuentemente desviaciones a la ley de Chick.



**Figura 3-6: Ley de Chick**

**Fuente: Jorge Arboleda Valencia (1992)**

En resumen la Ley de Chick, plantea que la tasa de mortalidad es proporcional al número de microorganismos presentes en un tiempo específico. Esto implica una susceptibilidad uniforme de todas las especies presentes, para un desinfectante en particular, una concentración constante de desinfectante y la ausencia de interferencia de otros componentes.



## 3.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DESINFECCIÓN.

### 3.2.1 RELACIÓN CONCENTRACIÓN - TIEMPO.

La eficiencia de la desinfección depende de la relación entre el tiempo de contacto y la cantidad de desinfectante dosificado. El tiempo de contacto t necesaria para matar un determinado número de organismos viene dado por la expresión de Watson:

$$t = K / C^n$$

**Ecuación 3-3: Ley de Watson**

**Fuente: Jorge Arboleda Valencia (1992)**

Donde,

K= Constante de la desinfección.

C= Concentración del desinfectante, en mg/l

n= Coeficiente que expresa la eficiencia bactericida del desinfectante y que se conoce como el coeficiente de disolución.

El valor K ha sido evaluado para distintos microorganismos y desinfectantes<sup>11</sup>, lo que permite conocer la relación concentración - tiempo necesario para realizar la desinfección<sup>12</sup>.

Organismo	HOCl	OCl	NH <sub>2</sub> Cl
E. Coli	0,24	15,6	66, 0
Virus de poliomielitis	1,2	---	---
Virus coxsakie A2	6,3	---	---

**Tabla 3-1: Valores de K**

**Fuentes: Clarke, N.A. Berg, G.; Kabler, P.W. & Chang, S.L., (Sept. 1962)**

<sup>11</sup> Clarke, N.A. Berg, G.; Kabler, P.W. & Chang, S.L., (Sept. 1962). "Human enteric viruses in water, source, survival and removability". Londres, International Conference on water Pollution Research.

<sup>12</sup> Jorge Arboleda Valencia, 1992, Teoría y Práctica De La Purificación del agua, Bogota, Ed.Acodal

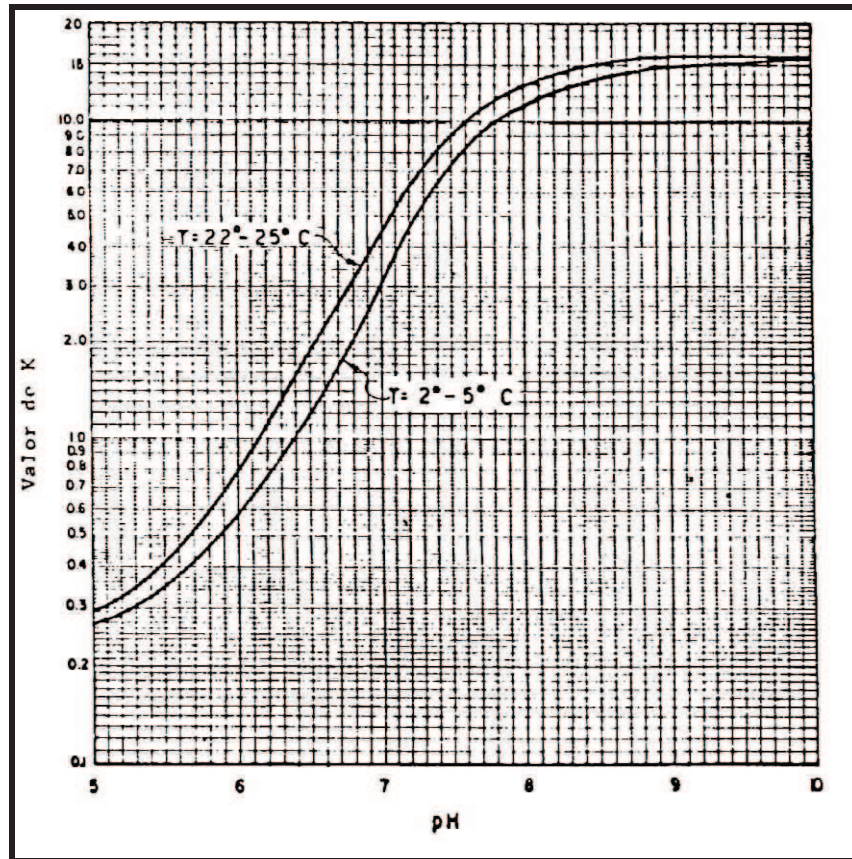


Figura 3-7: K en función del pH

Fuente: Jorge Arboleda Valencia (1992)

### 3.2.2 TEMPERATURA.

Las bacterias pueden vivir sólo a determinadas temperaturas, generalmente entre 5 °C y 80 °C. Igualmente, estas influyen en la rapidez con que una sustancia reacciona. Es lógica, por tanto, que la desinfección sea afectada por este factor. En términos generales, cuanto más caliente esté el agua tanto más eficiente y rápida será la desinfección, y por tanto la constante K aumentará.

Se ha encontrado la siguiente expresión para relacionar la constante K a la temperatura considerada, con el valor de la misma a 20 °C:

$$K = K_{20} (1 + \theta)^{(T-20)}$$

Ecuación 3-4: Constante de la desinfección K

Fuente: Jorge Arboleda Valencia (1992)

Donde,

$K$  = Constante de la desinfección a  $T$  °C

$K_{20}$  = Constante a 20 °C

$T$  = Temperatura en °C

$\theta$  = Factor que varía entre 0.06 y 0.08

### 3.2.3 POTENCIAL HIDRÓGENO (pH).

Las bacterias son altamente susceptibles al pH como a la temperatura. Los potenciales muy altos o muy bajos les son fatales. El pH óptimo de los microorganismos está alrededor de 7. En igual forma, la actividad de los desinfectantes químicos depende del pH del agua. Generalmente cada desinfectante presenta un rango de pH en el cual tiene su máxima efectividad, lo cual constituye su característica. A partir de este punto la eficiencia decrece para una misma dosis, un mismo tiempo de contacto y una misma temperatura<sup>13</sup>.

### 3.2.4 MODOS DE DESINFECCIÓN DEL AGUA.

La desinfección la podemos dividir en natural y artificial.

- La primera se refiere a la muerte progresiva de las bacterias, producida por agentes naturales tales como la luz solar, la sedimentación, la filtración en las capas arenosas del suelo, o la estabilización de la materia orgánica que disminuye la reserva de alimento para los microorganismos.
- La desinfección artificial puede realizarse mediante agentes físicos o químicos. Los agentes físicos son: El calor y los rayos ultravioletas. Los agentes químicos son: Los halógenos (cloro, bromo y yodo), la plata ionizada y el ozono.

---

<sup>13</sup>Arboleda J.V, (1992). Teoría y Práctica De La Purificación del agua, Bogotá, Ed.Acodal,

### 3.3 DESINFECTANTES FÍSICOS

#### 3.3.1 RAYOS ULTRAVIOLETAS.

La radiación ultravioleta, también conocida como luz negra, consiste en radiación electromagnética invisible al ojo humano, que se encuentra en la banda de frecuencias que van a continuación del espectro visible, hasta alcanzar los rayos X. Aunque este tipo de radiación es invisible, sus efectos se pueden hacer visibles al incidir sobre materiales que transforman la energía recibida a la región visible del espectro, en un proceso denominado fluorescencia.



**Figura 3-8: Lámparas para desinfección UV**

**Fuente: Lenntech (2009)**

Esto también permite que sustancias normalmente invisibles bajo la acción de la radiación visible, como ciertos tipos de tinta, se hagan visibles bajo la luz ultravioleta por fluorescencia, lo que tiene múltiples aplicaciones en la verificación de la legitimidad del dinero, y otros usos. Las longitudes de onda para la radiación ultravioleta están entre  $10^{-3}$  m y  $10^{-6}$  m y las frecuencias correspondientes están entre  $3 \times 10^{11}$  Hz y  $4 \times 10^{14}$  Hz. La energía de los fotones del espectro ultravioleta C (UVC) entre 100 y 200 nm es de 12,4 eV (electrón

voltios) mientras que la energía de enlace molecular es de 11,1 ev por lo que produce energía de ionización y ruptura de los enlaces moleculares siendo mutagénico y letal para la vida, como desinfectante se hace pasando una lámina de agua delgada bajo una fuente de rayos ultravioleta<sup>14</sup>.

Las fuentes de luz ultravioleta que más se usan son lámparas de arco de mercurio de mediana y de baja presión. El ultravioleta es una región de energía del espectro electromagnético que yace entre la región de radiografía y la región visible. UV por sí misma yace en las gamas de 200 nanómetros (1.0 nanómetro (nm) = 10 metros) a 390 nanómetros. Como los niveles de energía aumentan como los aumentos de longitud de onda, las radiografías tienen más energía que UV y UV tiene más energía que el espectro luz visible. El espectro UV se divide en cuatro regiones, que se designa el vacío UV, UV-A, UV-B, y UV-C. Nosotros particularmente nos enfocamos en los tres últimos<sup>15</sup>.

UV-A u onda larga ultravioleta, ocurre entre 325 y 390 nm, es representado por la luz solar. Este rango tiene poco valor germicida.

UV-B u onda media ultravioleta ocurre entre 295 y 325 nm y es mejor conocido para su uso en lámparas. Estas ondas medias también se encuentran en la luz solar y proveen de algún efecto germicida si la exposición es suficiente.

UV-C u onda corta ultravioleta ocurre entre 200 y 295 nm y es donde más ocurre el efecto germicida. La óptima acción UV germicida ocurre en 265 nm.

Dado que la onda corta se filtra naturalmente por la atmósfera de la tierra, rara vez se encuentra sobre la superficie. Para tener ventajas del potencial germicida de UV-C, nosotros debemos buscar medios alternos de producción de luz UV. La producción de radiaciones de energía UV debe por lo tanto de lograr la conversión de energía eléctrica. Esta conversión se realiza con una lámpara de baja presión de vapor de mercurio. La luz UV se produce como

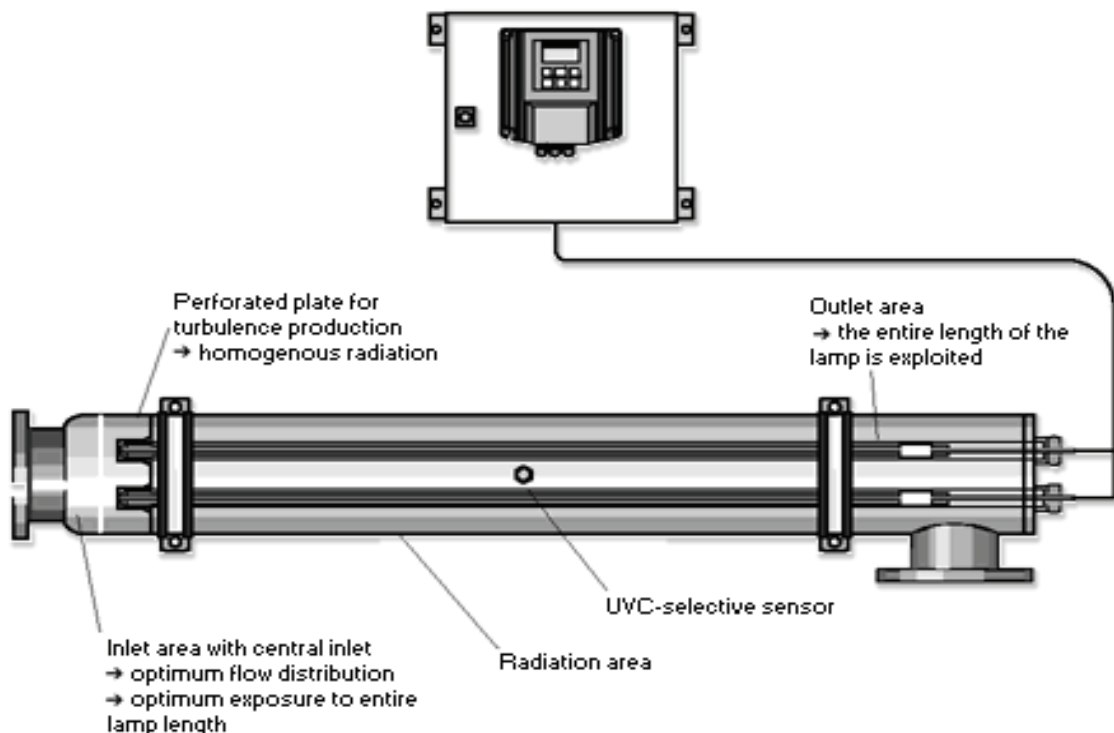
---

<sup>14</sup> Arboleda J.V, (1992). Teoría y Práctica De La Purificación del agua, Bogotá, Ed.Acodal

<sup>15</sup> Lenntech (2009), Drinking water production, Holding B.V. , Holanda

resultado de la corriente de electrones al través del vapor ionizado de mercurio entre los electrodos de la lámpara (es de notar que el resplandor azulado dado por la lámpara UV se debe al gas dentro de la lámpara y no tiene acción germicida por sí mismo).

Estas lámparas UV son similares en el diseño a las lámparas fluorescentes estándares con unas pocas diferencias notables. Las lámparas UV típicamente se fabrican con cristal duro de cuarzo a diferencia de cristal suave encontrado en lámparas fluorescentes. Este cuarzo permite una transmisión de energía radiada UV de 90%. Las lámparas fluorescentes también contienen un revestimiento delgado de fósforo que convierte el UV a la luz visible. Debido a la construcción individual de célula, niveles diferentes de energía UV se requieren para la destrucción. Las lámparas UV emiten sobre 90% de su energía radiante en 253.7 nm, que es muy cerca del pico eficiencia germicida de 265 nm.



**Figura 3-9: Esquema de un generador de luz UV**

**Fuente: Jorge Arboleda Valencia (1992)**

El grado de destrucción microbiológica es un producto de dos factores, que es la residencia real, o tiempo de contacto del agua está dentro de la cámara de

esterilización; y la intensidad, que es la cantidad de energía por unidad de área (calculada por dividir la producción en vatios por el área de superficie de la lámpara). Este producto de intensidad y el tiempo es conocido como la dosis y se expresa en microvatios, segundos por centímetro cuadrado ( $\mu\text{w}\cdot\text{seg}/\text{cm}^2$ )<sup>16</sup>.

### 3.3.1.1 Los Factores que Afectan la Radiación UV

La eficiencia de un sistema UV para eliminar la contaminación biológica es directamente dependiente de las calidades físicas del influente de agua:

- Sólidos Suspendidos o partículas ocasionan un problema de blindaje en que un microbio puede pasar al través del esterilizador sin realmente tener la penetración UV directa. Este blindaje puede ser reducido por la filtración mecánica a por lo menos cinco micras en el tamaño.
- Hierro Y Manganeso en niveles 0.03 ppm de hierro y 0.05 ppm de manganeso ocasionarán manchado sobre el cartucho de cuarzo o lámpara. Un apropiado pre tratamiento se requiere para eliminar este problema de manchado<sup>17</sup>.
- Calcio y Magnesio (Dureza) permitirá formación de incrustaciones sobre el cartucho de cuarzo o lámpara. Este problema especialmente se magnificará cuando el flujo es bajo (o ninguno) los iones de magnesio y calcio se unen con carbonatos y sulfatos para formar acumulación progresiva de incrustaciones dentro de la cámara de esterilizador y sobre la lámpara o cartucho.
- Otros Compuestos Absorbentes tales como ácido húmico y fúmico, así como también los taninos reducirán la cantidad de energía UV disponible para penetrar el agua y afectar el material genético DNA, de la célula.
- La temperatura es un factor determinante. La temperatura óptima de la lámpara UV debe estar cerca de 40 °C (104 °F). Los niveles de UV fluctuarán con niveles de temperatura excesivamente bajos o altos. Un cartucho de cuarzo se utiliza para mediar el contacto agua/lámpara, reduciendo fluctuación de temperatura. Un método típico empleado en un

---

<sup>16</sup> Rise et al; Herson et al, (1991); Correlation of coliform growth response with other water quality parameters, Journal AWWA.

<sup>17</sup> Lund y Omerod, (1995). The influence of disinfection process on biofilm formation in water distribution systems, Water Research, , vol. 29(4):1013-1021

sistema sin cartucho de cuarzo, es restringirlo considerando estas fluctuaciones.

### 3.3.1.2 Ventajas

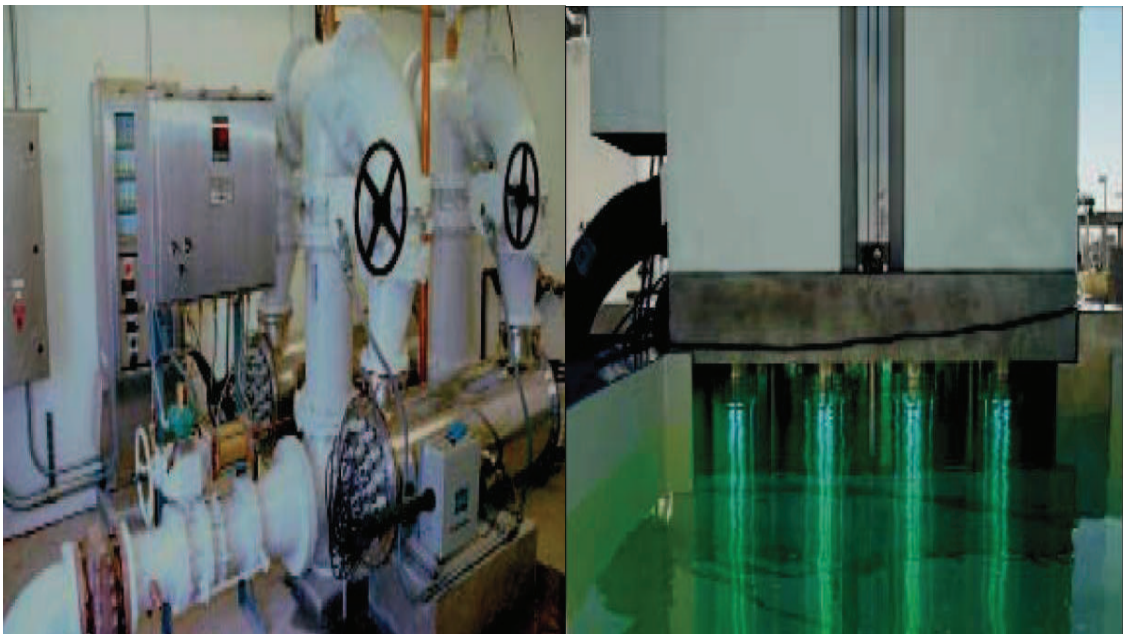
- El bajo costo de inversión inicial, así como también reducción de gastos de operación cuando se compara con tecnologías similares tales como ozono, cloro, etcétera.
- Proceso de tratamiento inmediato, no necesita tanques de retención.
- Ningún químico para agregar al abastecimiento de agua, ningún subproducto.
- No se ha podido determinar un nivel medible de incremento en la toxicidad de agua atribuible a subproductos de la desinfección por UV.
- Ningún cambio en el gusto, olor, pH o conductividad ni la química general del agua.
- La operación automática sin mediciones o atención especial.
- La simplicidad y facilidad de mantenimiento, período de limpieza y reemplazo anual de lámpara, sin partes móviles.
- Ninguna manipulación de químicos tóxicos, ninguna necesidad de requerimientos especializados de almacenaje.
- La instalación fácil, dos conexiones de agua y una conexión de energía.
- Más efectivo contra virus que el cloro.
- Es compatible con cualquier proceso de tratamiento de agua, por ejemplo: Osmosis Inversa, Destilación, Intercambio Iónico, etcétera.
- No hay adición de químicos al agua.
- No hay formación indeseada de sustancias en el agua.
- No modifica el sabor ni el olor del agua desinfectada.
- No hay manipulación ni almacenamiento de químicos.
- Sistema de manejo amigable, se requiere poco mantenimiento.
- Tecnología segura y fiable.
- Bajo precio y costos de operación.
- Las plantas de desinfección UV están diseñadas para un promedio de flujo de 1- 400 m<sup>3</sup>/h para diversas aplicaciones.



### 3.3.1.3 Subproductos de la Desinfección

Varios estudios han identificado y caracterizado los subproductos de desinfección UV derivados de reacciones fotoquímicas aparte de la dimerización de DNA<sup>18</sup> observó la formación de formaldehído, glioxal y acetaldehídos así como una reducción de 8 a 10 hidrocarburos de carbono cuando se irradiaba agua residual con UV procedente de lámparas de mercurio de baja presión.

Usando una dosis de 120 mW/cm<sup>2</sup> para desinfectar agua del río Rin, Zoeteman<sup>19</sup> reporta la formación de algunos subproductos de desinfección y alguna destrucción de compuestos. No se observó un incremento en la mutagenicidad del agua.



**Figura 3-10: Planta de tratamiento con luz UV**

**Fuente: Kruithof y Van der Leer, (1990)**

Un trabajo posterior de Kool et al<sup>20</sup> y Kruithof y Van der Leer<sup>21</sup> confirman que de la desinfección UV no resulta la formación de subproductos mutagénicos o

<sup>18</sup> Awad et al, (1993) Ultraviolet disinfection for water reuse, Whippany, NJ,

<sup>19</sup> Zoeteman et al, (1982). Mutagenic activity associated with byproducts of drinking water, J. AWWA

<sup>20</sup> Kool et al, (1985). Mutagenic & Carcinogenic properties of drinking water, Chelsea,

carcinogénicos ni causa la descomposición por oxidación de polímeros microbianos con base de azúcar.

### **3.3.2 CALOR.**

Es principalmente un sistema de desinfección doméstico no aplicable a plantas de purificación. Quince o veinte minutos a temperaturas de ebullición son suficientes para destruir cualquier microorganismo patógeno. El agua, sin embargo adquiere un sabor peculiar debido a la expulsión de los gases por el incremento de temperatura. Ordenes de ebullición del agua deben emitirse cada vez que se considere que existe un peligro para la salud<sup>22</sup>.

### **3.3.3 DESINFECCIÓN CON RADIACIÓN SOLAR.**

De los ensayos realizados se observa que la desinfección de aguas claras por acción de la radiación solar, en condiciones de luminosidad completa es eficiente con un período de exposición de por lo menos cinco horas para asegurar la eliminación completa de coliformes fecales. Para condiciones de luminosidad variable, es decir nublada o parcialmente nublada, se observa que la desinfección solar por la radiación solar es ineficiente, puesto que el número de coliformes fecales en ningún caso logra eliminar el 100%<sup>23</sup>.

Para aguas con presencia de turbiedad y color, la desinfección por acción de la radiación solar es ineficiente bajo cualquier condición de luminosidad. La disminución del conteo en coliformes fecales es de hasta un 94% pero en ningún caso llega al 100%. Se concluye que la desinfección con radiación solar en condiciones de luminosidad variable tanto para aguas claras como para aguas con presencia de color y turbiedad es ineficiente. (Ver anexo 1 y 2).

---

<sup>21</sup> Kruithof y Van der Leer, (1990). Practical experiences with UV disinfection in Netherlands, J. AWWA,

<sup>22</sup> Arboleda V. Jorge, (1992), Teoría y Práctica De La Purificación del agua, Bogotá, Ed.Acodal,

<sup>23</sup> Muñoz M. – Balarezo A., (1992). Métodos alternos de desinfección de agua para bebida y preparación de alimentos en el área rural, Ed. EPN-FIC, Quito,.

### **3.3.4 DESINFECCIÓN CON CALOR SOLAR.**

Con relación a la desinfección con calor solar se observa que bajo las condiciones especificadas de luminosidad (completamente soleado), temperaturas registradas y tiempos de exposición, es ineficiente para los dos tipos de recipientes utilizados. Los mismos que son sometidos a recubrimiento de pintura negra con el objeto de captar la mayor cantidad de energía calorífica proveniente de la luz solar. (Ver tabla del anexo 3).

La temperatura alcanzada en los recipientes es la temperatura ideal (37 °C) para el crecimiento bacteriano de microorganismos provenientes de seres vivos de sangre caliente, los mismos que son los principales contribuyentes en la contaminación, por lo que estos en algunos casos se han incrementado.

La investigación se realiza con recipientes de uso común en el área rural, considerando los más efectivos:

- Recipientes metálicos de aluminio de 6 litros de capacidad y diámetro 20 cm.
- Recipientes de barro cocido de 5 litros de capacidad y diámetro 20 cm.

### **3.3.5 MÉTODO SODIS**

El método SODIS de desinfección del agua mediante energía solar, es un sencillo proceso de tratamiento que permite mejorar la calidad del agua desarrollado en Dubendorf (suiza)<sup>24</sup>. Consiste en la neutralización, a través de la luz solar, de los patógenos causantes de diarreas.

El agua contaminada se introduce en botellas de plástico y se expone durante cinco horas a la acción de la luz solar. Durante la exposición, el sol destruye los patógenos. La luz solar desinfecta el agua y mata a los agentes causantes de

---

<sup>24</sup> Martin Wegelin, (2002). Método SODIS, Departamento de Agua y Saneamiento para Países en Vías de Desarrollo (SANDEC), Dubendorf, Suiza,

la diarrea, gracias a la combinación de dos efectos: la radiación ultravioleta y el incremento de temperatura del agua. Para que el método funcione eficazmente es necesaria una exposición de cinco horas bajo una radiación solar de al menos  $500 \text{ W/m}^2$ . Esto se consigue en latitudes medias con cinco horas de exposición en verano.

El efecto conjunto de la temperatura y la radiación se produce cuando el agua supera los  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , momento a partir del cual el proceso de desinfección requiere un tercio de la radiación. El agua es apta para el consumo tras una hora de exposición a más de  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 3.3.5.1 Resultados Obtenidos

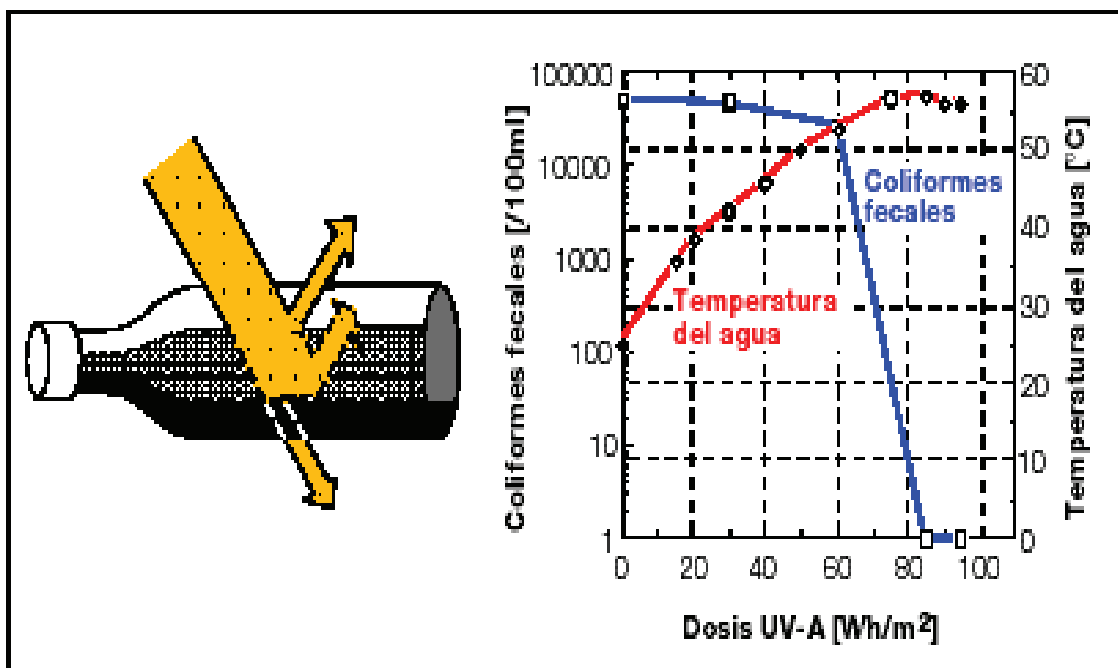


Figura 3-11: Efecto desinfectante de la luz solar

Fuente: Martin Wegelin, (2002)

La radiación solar tiene tres rangos de longitud de onda: la luz visible, la radiación ultravioleta (UV) y la radiación infrarroja. Del espectro de la luz UV cercana, la UV-A es la que llega a la superficie terrestre y tiene un efecto nocivo para muchos microorganismos que viven en el agua, son sensibles a esta luz y no pueden adaptarse a estas condiciones de vida debido a que su

hábitat es el oscuro sistema digestivo. Estos microorganismos son sensibles al calor (radiación infrarroja) y son eliminados cuando el agua alcanza temperatura de 50 °C con tiempo de exposición al sol de una hora. Por lo tanto, la combinación de estos dos factores elimina eficazmente muchos elementos patógenos como la bacteria de la diarrea o el cólera.

### 3.3.5.2 Botellas a Utilizar

En la práctica se pueden usar botellas de vidrio o cualquier tipo de botella de plástico (hay dos tipos de botellas de plástico, las fabricadas con tereftalato de polietileno (PET) y las fabricadas con cloruro de polivinilo (PVC), pero los mejores resultados se obtienen con botellas tipo PET, por su duración, forma, transparencia y facilidad de transporte. Este tipo de botellas se puede reconocer por que no presentan el brillo azulado de las de tipo PVC y además se queman más rápidamente.



Figura 3-12: Método SODIS

Fuente: Martin Wegelin, (2002)

## 3.4 DESINFECTANTES QUÍMICOS

Los desinfectantes químicos más importantes son los halógenos, la plata ionizada y el ozono. Entre los halógenos el más conocido de todos es el cloro, el cual por ser ampliamente utilizado lo vamos a estudiar en detalle.

### 3.4.1 EL CLORO.

#### 3.4.1.1 Propiedades y química del cloro.

El elemento cloro fue descubierto en 1774 por el químico sueco C.W. Scheele; en 1805 Thomas Northuore licuó el gas por vez primera, y en 1810 fue identificado como elemento por Sir Humphrey Davy, quien le dio el nombre de cloro<sup>25</sup>. El cloro existe como un gas amarillo-verdoso a temperaturas y presiones ordinarias.

Nombre	Cloro
Número atómico	17
Valencia	+1,-1,3,5,7
Estado de oxidación	-1
Electronegatividad	3.0
Radio covalente (Å)	0,99
Radio iónico (Å)	1,81
Radio atómico (Å)	-
Configuración electrónica	[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup>
Primer potencial de ionización (eV)	13,01
Masa atómica (g/mol)	35,453
Densidad (g/ml)	1,56
Punto de ebullición (°C)	-34,7
Punto de fusión (°C)	-101,0
Descubridor	Carl Wilhelm Scheele en 1774

Tabla 3-2: Propiedades del Cloro

Fuente: Kirchner Cliff J. (1977)

<sup>25</sup> Kirchner Cliff J., (1977). Desinfección, CEPIS, Lima,.

El cloro seco es algo inerte, pero húmedo se combina directamente con la mayor parte de los elementos. Actualmente se produce cloro en el ámbito comercial por medio de una oxidación anódica de cloruro sódico en solución acuosa:



**Ecuación 3-5: El Cloro**

**Fuente: Kirchner Cliff J. (1977)**

Simultáneamente, se producen hidrógeno e hidróxido de sodio en el cátodo,



**Ecuación 3-6: Producción de Hidróxido de Sodio**

**Fuente: Kirchner Cliff J. (1977)**

La reacción total, por lo tanto, es la siguiente:



**Ecuación 3-7: Producción de Cloro**

**Fuente: Kirchner Cliff J. (1977)**

El gas se licúa por presión a 1.75 kg/cm<sup>2</sup>, a una temperatura entre -4 y -18°C.

En la tabla 3-3 se presentan algunas propiedades físicas del cloro:

Temperatura crítica	143.5 °C (grados centígrados)
Presión crítica	76. 1 atm
Densidad	0. 56 g/cm <sup>3</sup>
Gravedad específica (líquido)	1. 57 g/cm <sup>3</sup>
Punto de ebullición (líquido)	-34,05 grados C
Punto de congelación (líquido)	- 102. 4 grados C
Solubilidad en el agua	7300 mg/ lit. a 20 grados C y 1 atm.
Peso molecular	70.906 g/mol

**Tabla 3-3: Propiedades físicas de Cloro**

**Fuente: Kirchner Cliff J. (1977)**

Como se puede apreciar en la tabla anterior, el cloro presenta una solubilidad de menos del 1 en el agua. Por lo tanto es preciso utilizarlo en cilindros y no en soluciones acuosas para el abastecimiento de plantas de agua potable.

La cloración es el proceso de desinfección que hasta el presente reúne las mayores ventajas: es eficiente, fácil de aplicar y deja efecto residual que se puede medir por sistemas muy simples y al alcance de todos. Este último se comprime a 1,74 atm y se enfría a 4 ó 18 °C hasta licuarlo, hecho esto se envasa en cilindros metálicos resistentes de 100, 150 y 2000 libras que lo conserven a alta presión<sup>26</sup>.

Símbolo ó fórmula	Cl <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub>	NaOCl	Ca(OCl) <sub>2</sub>
Peso Molecular	70,9	70,9	74,45	142,99
Estado	Gas	Líquido	Líquido	Granular
Color	Verde	Verde	Amarillo	Amarillo
Peso Específico (aire=1, agua=1)	2,48 0 °C y 1 atm	2,48 0 °C y 1 atm	1,2	0,8
Punto de congelación		-100,98		
Punto de licuefacción (ebullición)	-34,5 °C (1 at)	-35,5 °C (1 at)		
Cloro disponible	99,80%	99,80%	12 – 15 %	70%
Forma de empaque		Cilindros de 100, 150 y 2000 lb	Barriles	Barriles, sacos
Materiales que resisten el ataque	Seco: Hierro negro, cobre y acero. Húmedo: vidrio, plata, caucho.	Seco: Hierro negro, cobre y acero. Húmedo: PVC, teflón, polietileno.	Cerámico, vidrio, plástico ó caucho.	Cerámico, vidrio, plástico ó caucho.

**Tabla 3-4: Propiedades del Cloro y sus derivados**

**Fuente: Kirchner Cliff J. (1977)**

<sup>26</sup> Jorge Arboleda Valencia, Teoría y Práctica De La Purificación del agua, Bogota, Ed.Acodal, 1992, Págs. 585-645



### 3.4.1.2 Reacciones del cloro en el agua.

#### 1. Reacciones hidrolíticas.

El cloro residual se forma en dos etapas:

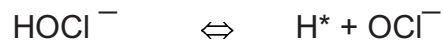
a) Hidrólisis, que se efectúa en fracciones de segundo:



**Ecuación 3-8: Hidrólisis del Cloro**

**Fuente: Kirchner Cliff J. (1977)**

b) Disociación, en que el ácido hipocloroso, inestable parcialmente, se ioniza así:



**Ecuación 3-9: Reacción del Ácido Hipocloroso**

**Fuente: Kirchner Cliff J. (1977)**

Queda entonces en el agua parte del cloro residual como HOCl y otra parte como OCl que resulta de la ionización del ácido hipocloroso. La proporción en que existe uno y otro depende directamente del pH y tiene mucha importancia por cuanto el HOCl es un buen bactericida poderoso, mientras que el OCl es un bactericida muy pobre, como se verá posteriormente. La constante de ionización Ka es igual a:

$$K_a = \frac{(\text{H}^+) (\text{OCl}^-)}{(\text{HOCl})}$$

**Ecuación 3-10: Constante de Ionización Ka**

**Fuente: Kirchner Cliff J. (1977)**

La constante Ka varía con la temperatura como se ve a continuación:

Temperatura	0	5	10	15	20	25
Ka 10 <sup>-8</sup>	2	2,3	-2,6	3	3,3	3,7

**Tabla 3-5: Valor de la constante Ka**

**Fuente: Kirchner Cliff J. (1977)**

De la expresión obtenemos que:

$$\text{OCI}^- = K_a (\text{HOCl}) / (\text{H}^*)$$

El cloro libre total Ct es igual a:

$$\text{Ct} = (\text{HOCl}) + (\text{OCI}^-)$$

**Ecuación 3-11: Cloro Libre Total Ct**

**Fuente: Kirchner Cliff J. (1977)**

Reemplazando (OCI) por su valor:

$$\text{Ct} = (\text{HOCl}) + K_a (\text{HOCl}) / (\text{H}^*)$$

O sea:

$$\text{Ct} = (\text{HOCl}) (1 + K_a / (\text{H}^*))$$

**Ecuación 3-12: Cloro Libre Total Función de Ka**

**Fuente: Kirchner Cliff J. (1977)**

O en otra forma:

$$(\text{HOCl}) / \text{Ct} = 1 / [1 + K_a / (\text{H}^*)]$$

Como:

$$\text{pH} = \log [1 / (\text{H}^*)] \text{ ó anti log } \text{pH} = 1 / \text{H}^* = 10^{(\text{pH})}$$

**Ecuación 3-13: pH**

**Fuente: Kirchner Cliff J. (1977)**

Reemplazando este valor en la fórmula:

$$(\text{HOCl}) / \text{Ct} = [1 + K_a 10^{(\text{pH})}]^{-1} \text{ ó } (\text{HOCl}) = \text{Ct} / [1 + K_a 10^{(\text{pH})}]$$

**Ecuación 3-14: Ácido Hipocloroso en función de Ct y Ka**

**Fuente: Kirchner Cliff J. (1977)**

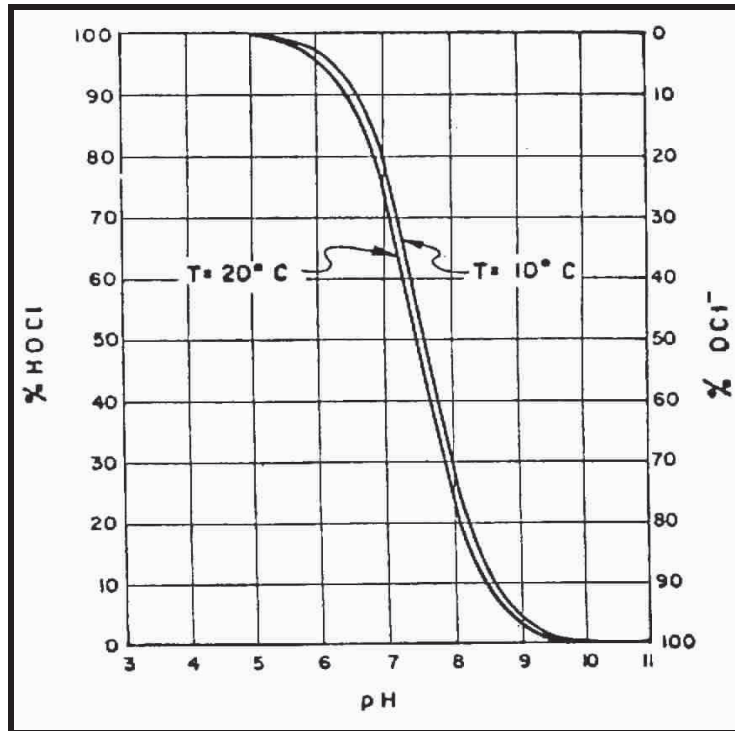


Figura 3-13: pH vs %HOCl y %OCl<sup>-</sup>

Fuente: Kirchner Cliff J. (1977)

De la fórmula anterior se desprende que cuanto menor sea el pH habrá mayor concentración de HOCl. Si queremos conocer el % de HOCl, haciendo  $C_t$  igual a la unidad, bastará multiplicar por 100 el resultado<sup>27</sup>.

La figura 3-13 muestra cómo está hecha la distribución de los compuestos a 20°C y a 10°C, en ellas se puede leer que a un pH igual o mayor a 10, todo el cloro libre está en forma de ión hipoclorito y, en cambio, a un pH igual o inferior a 5.5 todo el cloro libre está en forma de ácido hipocloroso<sup>28</sup>. Véase figura 3-14.

En estos casos el cloro gaseoso tiene la tendencia a escapar, por lo que se prepara en los cloradores se prefiere que no tenga una concentración mayor de 35000 mg/l para limitar un 30 % el cloro no disuelto y así evitar la corrosión de los objetos metálicos que puedan encontrarse en la zona del punto de aplicación, por el tanque de los llamados “humos de cloro”.

<sup>27</sup> Kirchner Cliff J., (1977). “Desinfección”, CEPIS, Lima, Págs. 585-645

<sup>28</sup> Arboleda V. Jorge (1992), Teoría y Práctica De La Purificación del agua, Bogota, Ed.Acodal,

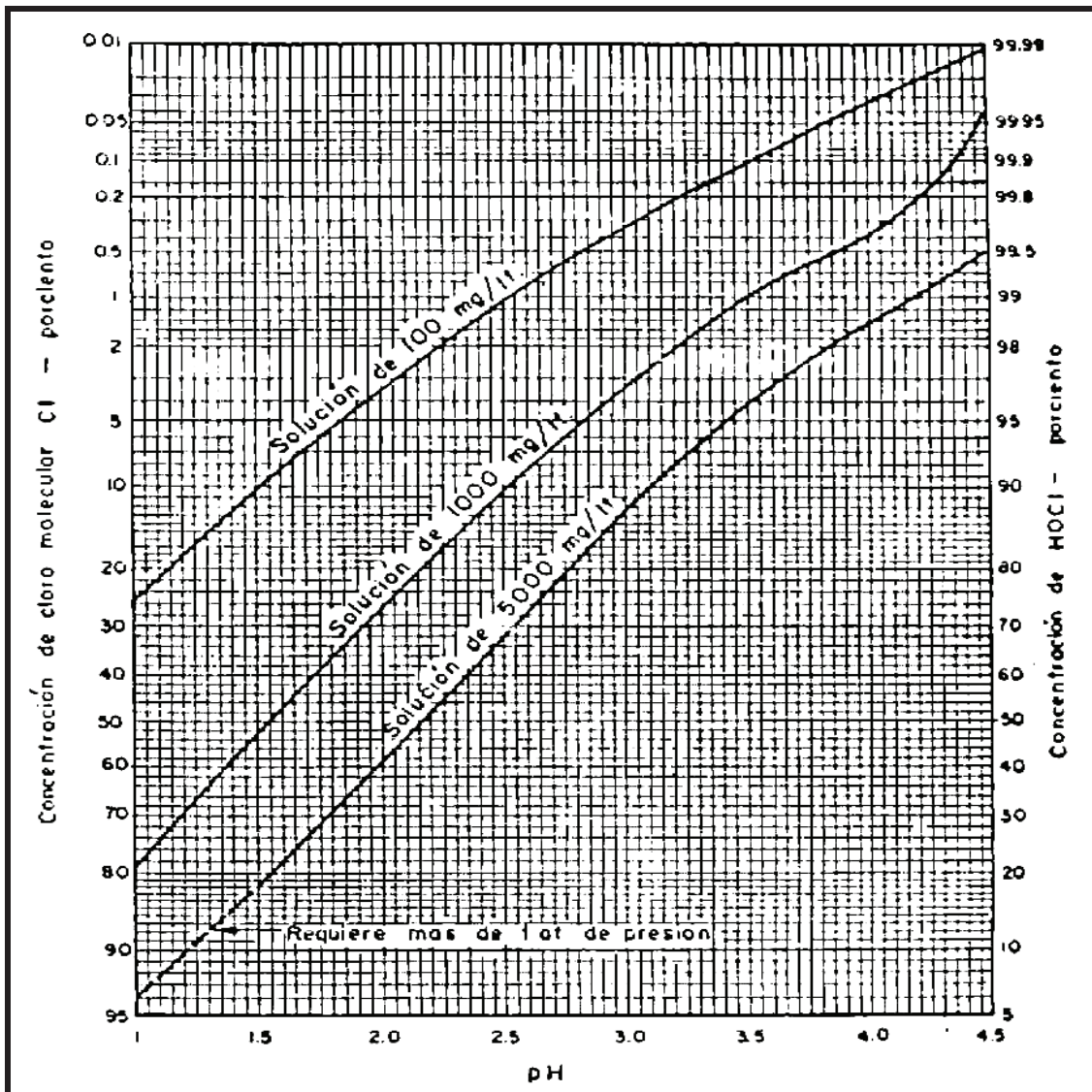


Figura 3-14: pH vs Cloro Molecular Gaseoso

Fuente: Arboleda V. Jorge (1992)

Los hipocloritos de calcio ( $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ ) y sodio ( $\text{NaOCl}$ ) reaccionan en la forma similar a las del cloro gaseoso que se presenta a continuación:



Ecuación 3-15: Hipoclorito de Calcio

Fuente: Arboleda V. Jorge (1992)



Ecuación 3-16: Hipoclorito de Sodio

Fuente: Arboleda V. Jorge (1992)

Así:



**Ecuación 3-17: Reacción del Hipoclorito de Calcio**

**Fuente: Arboleda V. Jorge (1992)**

La del hipoclorito de sodio:



**Ecuación 3-18: Reacción del Hipoclorito de Sodio**

**Fuente: Arboleda V. Jorge (1992)**

En ambas reacciones aparece el ión hipoclorito  $\text{OCl}^-$ , el cual reacciona con el hidrógeno para formar ácido hipocloroso. Así:



**Ecuación 3-9: Reacción del Ácido Hipocloroso**

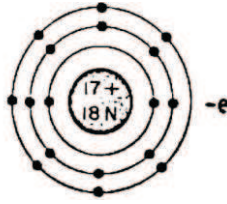
**Fuente: Kirchner Cliff J. (1977)**

El ácido hipocloroso así formado establece un equilibrio con el ión hipoclorito, como en el caso del cloro gaseoso, el cual depende de la concentración de iones  $\text{H}^+$ , esto es del pH.

**2. Reacciones de oxidación - reducción.**

El átomo de cloro está compuesto por un núcleo de 17 protones y 18 neutrones (peso atómico 35.46), rodeado de 17 electrones, distribuidos en tres niveles de energía. Por tanto el átomo de cloro puede:

- a. Ceder uno o varios de los siete electrones periféricos para formar cloraminas ( $\text{NH}_2\text{Cl}$ ,  $\text{NHCl}_2$ ,  $\text{NCl}$ ). Obsérvese que en este trabaja con valencias positivas +1,+2 y +3.
- b. Aceptar un electrón para completar los ocho periféricos, como cuando forma cloruros ( $\text{Na}^+ \text{Cl}^-$ ,  $\text{H}^+ \text{Cl}^-$ ). En este caso actúa con valencia 2 negativa -1.



**Figura 3-15: Átomo de Cloro**

**Fuente: Arboleda V. Jorge (1992)**

En el primer tipo de reacciones, en que el cloro actúa con valencia positiva, se forman productos (cloraminas) que tienen propiedades desinfectantes bien definidas y un poder de oxidación suficiente para combinarse con indicadores de cloro.

En el segundo tipo de reacciones, en que el cloro actúa con valencia negativa, se forman compuestos que no tienen propiedades desinfectantes y que no reaccionan con los indicadores de cloro, no es detectable como cloro residual ni utilizable como desinfectante, recibe el nombre de demanda, y se define como la diferencia entre el cloro aplicado y el cloro medido después de un determinado tiempo de contacto<sup>29</sup>.

Reacción	Hidrólisis	Oxidación – Reducción	
Reacciona con:	H <sub>2</sub> O	N amoniacal	Materia orgánica, Fe, Mn, SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, etc.
Produce:	HOCl, OCl	NH <sub>2</sub> Cl, NHCl <sub>2</sub> , NCl <sub>3</sub>	Cloruros, HCl, NO <sub>2</sub> , etc.
Se denomina:	Cloro libre	Cloro combinado	Demanda

**Tabla 3-6: Reacciones de cloro en el agua**

**Fuente: Arboleda V. Jorge (1992)**

### ***3. Reacciones del cloro con el nitrógeno amoniacal.***

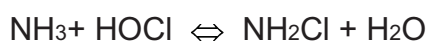
El cloro reacciona con el nitrógeno amoniacal para formar cloraminas. Las que más frecuentemente aparecen son la monocloramina NH<sub>2</sub>Cl y la dicloramina NHCl<sub>2</sub>. Ambas tienen un poder bactericida varias veces menor que el del ácido hipocloroso, pero en cambio son mucho más estables y por consiguiente su

<sup>29</sup> Arboleda V. Jorge (1992), Teoría y Práctica De La Purificación del agua, Bogota, Ed.Acodal, ,

efecto dura por más tiempo en el agua. En ciertas condiciones puede aparecer tricloruro de nitrógeno o tricloramina  $\text{NCl}_3$

Las cloraminas son tóxicas para los peces y son perjudiciales para los pacientes de diálisis. En Estados Unidos se ha fijado por eso una concentración máxima de 2.5 mg/l. El amoníaco no reacciona, según se cree, directamente con el cloro sino con el ácido hipocloroso, formado por hidrólisis del cloro, tal como se explico previamente.

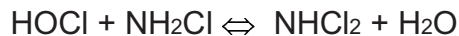
Las reacciones serían las siguientes:



**Ecuación 3-19: Reacción de la Monocloramina**

**Fuente: Kirchner Cliff J. (1977)**

A partir de la monocloramina se forma la dicloramina así:



**Ecuación 3-20: Reacción de la Dicloramina**

**Fuente: Kirchner Cliff J. (1977)**

Y a partir de la dicloramina se forma la tricloramina sí:



**Ecuación 3-21: Reacción de la Tricloramina**

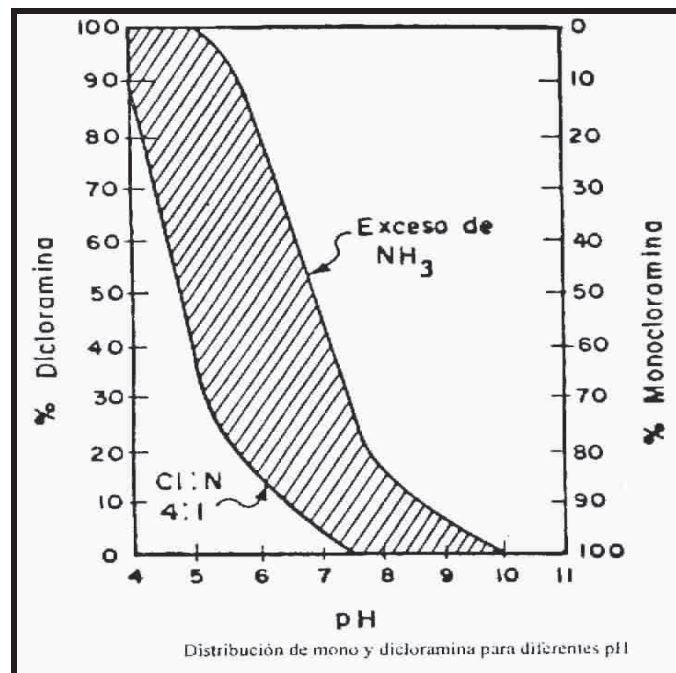
**Fuente: Kirchner Cliff J. (1977)**

La distribución en el agua entre uno y otro tipo de cloramina depende del pH, de la temperatura y de la proporción que existe entre el cloro y el amoníaco expresado como nitrógeno. Esta relación, que tiene gran importancia, se expresa así:

$$\text{Peso molécula de cloro} / \text{Peso molécula de nitrógeno} = (2 \times 35.46) / 14.008$$
$$(\text{Cl}) = 5 (\text{N})$$

Esto quiere decir que la proporción teórica que debe existir para que todo el cloro reaccione con el amoníaco debe ser de 5 a 1 en peso o sea que una parte de cloro reacciona con 5 partes de nitrógeno.

Para una relación  $Cl_2/N$  de 5 a 1 y pH superior a 9, prácticamente todo el residual está formado de monocloramina; entre  $pH = 5$  y  $pH = 9$  hay proporciones variables de mono y dicloramina; entre  $pH = 5$  y  $pH = 4$  todo el residual es dicloramina; y por debajo de 4.4 empieza a aparecer el tricloruro de nitrógeno<sup>30</sup>. El tricloruro de nitrógeno, sin embargo se produce no solo a  $pH = 4.4$  o inferior sino también a pH mayor cuando se clora con cloro libre en presencia de amonio o amonio combinado orgánico.



**Figura 3-16: pH vs. Mono y Dicloraminas**

**Fuente: Arboleda V. Jorge (1992)**

Este compuesto tiene un mal olor característico y debe por eso evitarse que aparezca. Es además explosivo y ha causado, por eso, serios problemas en plantas de tratamiento. Cuando más baje el pH y más suba la concentración de cloro, tanto más  $NCl_3$  se produce. Los compuestos de cloro combinado con

<sup>30</sup> Arboleda V. Jorge (1992), Teoría y Práctica De La Purificación del agua, Bogota, Ed.Acodal,



amoníaco u otros compuestos nitrogenosos reciben el nombre de “cloro combinado”.

El cloro combinado tiene menos efectividad desinfectante que el cloro libre. La tabla 3-8 presenta un resumen de la efectividad como desinfectante, de diferentes concentraciones y de distintas formas de cloro para dar 99% de efecto germicida en 10 minutos a 5 °C<sup>31</sup>.

Tipo de organismo	Concentración requerida (mg/l)				
	HOCl	OCl	NH <sub>2</sub> Cl	Cloro libre a pH 7,5	cloro libre a pH 8
Bacteria entérica	0,02	2	5	0,04	0,1
Virus	0,002-0,4	hasta 20	100	Hasta 0,8	hasta 2
E. Histolítica, quistes	10	1000	0:00	0:00	50
Bacterias esporuladas	10	1000	400	20	50

**Tabla 3-7: Desinfección de diferentes formas de Cloro**

Fuente: Kirchner Cliff J. (1977)

#### ***4. Reacciones del cloro con la materia orgánica y otros compuestos químicos.***

El cloro reacciona con el nitrógeno orgánico y con ciertas sustancias químicas perdiendo su poder oxidante para producir cloruros, ácido clorhídrico, óxidos de nitrógeno, cloro - orgánicos y una variedad de compuestos más.

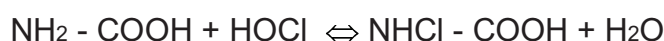
El nitrógeno orgánico que está formado básicamente por proteínas, peptonas, aminoácidos y materia orgánica en general, reacciona muy lentamente durante días y aún semanas con el cloro.

El nitrógeno amoniacal, en cambio y las sustancias químicas tales como los fenoles de hierro, el ácido sulfhídrico el manganeso la alcalinidad reaccionan con la relativa rapidez de menos de una hora. El nitrógeno amoniacal desaparece antes de una hora. En cambio, el nitrógeno albuminoideo, que

<sup>31</sup> Kirchner Cliff J., (1977). Desinfección, CEPIS, Lima,

puede considerarse como la indicación de la concentración de proteínas y el nitrógeno total apenas si disminuyeron durante las 72 horas.

Por su parte la demanda de cloro hizo bajar el cloro residual de 9 mg/l que fue la dosis aplicada. A 3.35 mg/l al cabo de una hora, y necesito 71 horas más para consumir el resto de cloro. La reacción del cloro con las proteínas es lenta. La reacción con los aminoácidos puede expresarse así:



**Ecuación 3-22: Reacción del Cloro con los Aminoácidos**

**Fuente: Ingols, R.S.& Gaffeney, P.E., (Nov. 1964)**

Algunos de los aminoácidos resisten la oxidación por el cloro y quedan como aminoácidos clorados, los cuales además de tener mal olor se teme que pueden ser tóxicos para peces y hombres<sup>32</sup>. Aminoácidos tales como la glicina y la cisteína son atacados por el HOCl, con oxidación del carbono más que el nitrógeno<sup>33</sup>.

La reacción con los fenoles es la siguiente:



**Ecuación 3-23: Reacción del Cloro con los Fenoles**

**Fuente: White G.C. (Jun. 1974)**

En esta reacción se produce clorofenol que tiene un sabor muy desagradable en el agua. El cloro libre también puede reaccionar con otra serie de compuestos orgánicos para formar un sin número de subproductos de la cloración (SPC), algunos de los cuales se han identificado como cancerígenos, mutagénicos, teratógenos o tóxicos.

En la práctica los (THMs) se producen por la reacción del cloro con los siguientes elementos orgánicos:

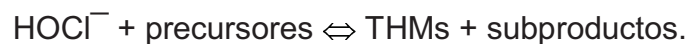
---

<sup>32</sup> Ingols, R.S.& Gaffeney, P.E., (Nov. 1964). "Biological studies of halophenols". Oklahoma Industrial waste conference. Oklahoma state University,

<sup>33</sup> White G.C. (Jun. 1974). "Desinfection: the las line of defense for defense for potable water". Paper present at the AWWA Conference

- Plantas: Ácidos fúlvico y húmicos productores de color, productos de degradación de la materia orgánica.
- Algas: Biomasa de gas, amino ácidos y pirimidinas (triptofanos).
- Hombre: Desechos industriales (fenoles).

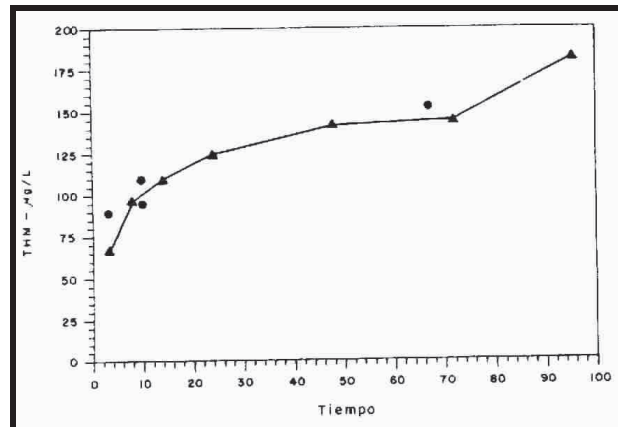
A los anteriores compuestos se los llama precursores, de forma que la reacción se establece de la siguiente manera:



**Ecuación 3-24: Reacción del Cloro con los Precursores**

**Fuente: White G.C. (Jun. 1974)**

Obsérvese que el cloro libre que reaccione con los precursores. De manera que cuando en el agua existe suficiente amoníaco para reaccionar con el cloro y lo que se producen son cloraminas, la concentración de THMs generados es muy baja o inexistente.



**Figura 3-17: Crecimiento de los trihalometanos (THMs)**

**Fuente: Koch B., Krasmer S.W. y otros. (1991)**

Por otra parte debe tenerse en cuenta que (ver figura 3-17):

- La velocidad de la reacción del  $\text{OHCl}^-$  con los precursores es lenta y por lo general demora varias horas. De aquí que la concentración de THMs aumenta con el tiempo.
- El incremento de la temperatura acelera la reacción, y por lo tanto la producción de THMs.

c. A mayor pH la formación de THMs se hace más rápidamente y es más alta.

Entre más grande sea la concentración de ácidos húmicos mayor es la producción de THMs. En la figura 3-17 se muestra el crecimiento de los trihalometanos (THMs) con el tiempo en la Planta de filtración de Diemer (1989). Obsérvese que los THMs crecen de manera similar a como lo hace la demanda<sup>34</sup>.

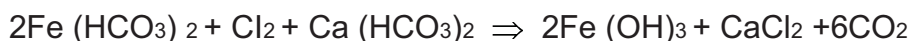
Las reacciones con los compuestos inorgánicos son más simples. Con el ácido sulfhídrico es como sigue:



**Ecuación 3-25: Reacción del Cloro con el Ácido Sulfhídrico**

**Fuente: Koch B., Krasmer S.W. y otros. (1991)**

Por consiguiente 8.32 mg/l de cloro se requieren para oxidar 1 mg/l de ácido sulfhídrico. Obsérvese que en esta reacción el cloro se ha utilizado para formar HCl. La reacción con el hierro se puede expresar así:



**Ecuación 3-26: Reacción del Cloro con el Hierro**

**Fuente: Koch B., Krasmer S.W. y otros. (1991)**

De acuerdo con esta reacción cada mg/l de hierro que se quiera remover requiere 0.64 mg/l de cloro y consume 0.9 mg/l de alcalinidad. Aquí el cloro se ha reducido para formar un cloruro ( $\text{CaCl}_2$ ). La reacción con el manganeso es como sigue:



**Ecuación 3-27: Reacción del Cloro con el Manganeso**

**Fuente: Koch B., Krasmer S.W. y otros. (1991)**

---

<sup>34</sup> Koch B., Krasmer S.W. y otros. (Oct. 1991) "Predicting the formation of DBPs by simulated distribution system. Journ AWWA, Vol. 83, pag. 62

De acuerdo con esta reacción se necesita 1.3 de mg/l de cloro libre para oxidar 1mg/l de magnesio y se consumen en la reacción 3.4 mg/l de alcalinidad. Al igual que en las otras, aquí el cloro ha pasado a formar un compuesto con valencia negativa (NaCl).

### ***5. Reacciones del cloro con compuestos orgánicos***

Investigaciones realizadas en 1974 mostraron que el cloro reacciona con compuestos orgánicos en el agua y forma compuestos organohalogenados. Entre estos compuestos, los principales son los trihalometanos, especialmente el cloroformo<sup>35</sup> que es un compuesto carcinogénico.

#### **3.4.1.3 Interferencias en la cloración**

##### ***a. Turbiedad.-***

El efecto que la turbiedad, y en general las partículas flotantes en el agua, hace más lenta la acción del cloro. Esto haría necesario aumentar el tiempo de contacto o la concentración para obtener resultados satisfactorios.

##### ***c. Nematodos.-***

El cloro, aún en altas dosis, no destruye los nematodos, Wen- Tung Wei y colaboradores<sup>36</sup>, sin embargo, demostraron que si los nematodos están muertos, el 96% son removidos por filtros.

##### ***d. Temperatura.-***

Las bajas temperaturas deben considerarse también como una interferencia para cloración. Los valores de Ct aumentan significativamente al bajar la temperatura.

---

<sup>35</sup> Kirchmer Cliff J., (1977). Desinfección, CEPIS, Lima,

<sup>36</sup> Wen Tung Wei Irvin, engelbrecht, R.S. & Asustin, J.H., (Feb. 1969). "Removal of nematodes by rapad sand filtration. Journal of Sanitary Engineering Division. Proceedings of ASCE, SA1,

*e. Calcio.-*

El contenido de calcio del agua parece que perjudica la eficiencia de la disección aún en concentraciones pequeñas, del orden de 1 mg/l. La razón para esto no está clara. Se ha sugerido que los iones bivalentes de Ca \*\* pueden ser absorbidos por las bacterias, cuya carga es negativa, y formar costras protectoras alrededor de ellas.

*f. Potencial hidrógeno.-*

Los altos pH del agua (9) no sólo desaceleran las reacciones químicas entre el cloro y el amoníaco, sino que además inducen la formación de compuestos clorados de baja efectividad. Debe por eso alcalinizarse el agua después de la cloración y no antes de ella.

*g. Fenoles.-*

Este actúa con el cloro para formar compuestos tales como clorofenol y diclorofenol los cuales comunican en típico sabor a yodoformo al agua que se puede detectar en concentraciones muy pequeñas, del orden de 0.002 mg/l. Esto quiere decir que dos gramos podrían darle mal olor a un tanque de almacenamiento de 100 m<sup>3</sup>. La intensidad del sabor de clorofenol cambia con el pH y el tiempo, ver figura 3-18.

Para la misma concentración de fenol, menos dosis de cloro, mayor intensidad de olor, el cual permanece a elevados niveles por largo tiempo. En cambio a mayor dosis de olor se produce rápidamente pero permanece por menos tiempo<sup>37</sup>. Esto puede deberse al incremento de la velocidad de la reacción, al aumentarse la concentración de cloro en el agua.

---

<sup>37</sup> Lee, CF. (1967). Kinetic of reactions between chlorine and phenolic compounds. Principles and applications of water chemistry. Weley & Son, Inc. N.Y..

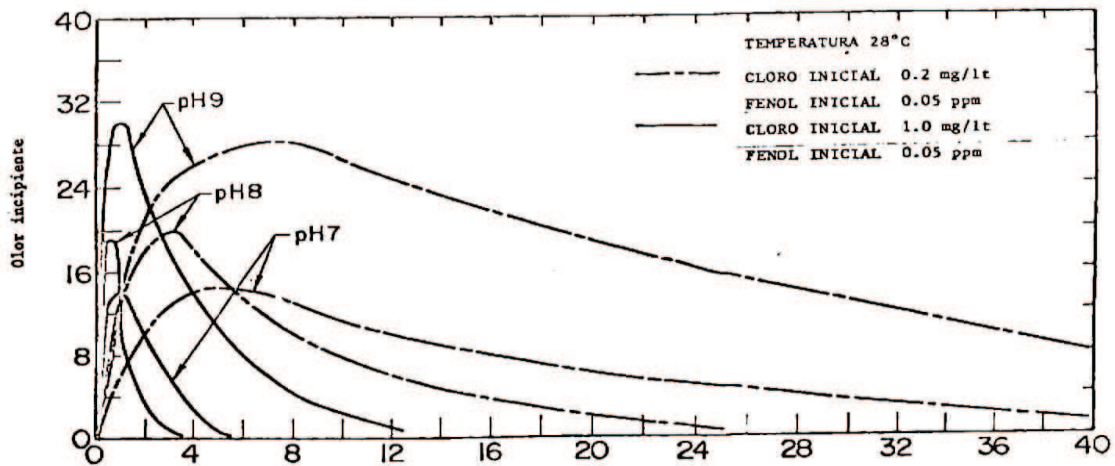


Figura 3-18: EL Clorofenol

Fuente: Lee, CF. (1967)

#### 3.4.1.4 El fenómeno del punto de quiebre.

La curva de punto de quiebre, tiene distinta configuración según sea la concentración de nitrógeno presente en el agua<sup>38</sup>. Vamos a considerar cuatro casos:

*Caso 1:* Si no existe ningún tipo de nitrógeno, el cloro residual aumenta en proporción directa al cloro aplicado y no se presenta punto de quiebre. Todo el cloro residual aparecería como cloro libre.

*Caso 2:* Si existe nitrógeno amoniacal (véase figura 3-19), pero no nitrógeno orgánico, el cloro que se aplique reaccionará con el HOCl de acuerdo con la ecuación  $\text{OCl}^- + \text{H}^+ = \text{HOCl}$  para formar monocloramina (véase figura 3-20) mientras exista un exceso de amoniaco (zona 1).

En cuanto se alcanza la relación equimolar, al seguir agregando cloro la monocloramina se va transformando en dicloramina que transmite un característico mal olor al agua. A su vez, la dicloramina va reaccionando con el exceso de cloro y produciendo nitrógeno y óxidos de nitrógeno, que son gases

<sup>38</sup> Jorge Arboleda Valencia, 1992, Teoría y Práctica De La Purificación del agua, Bogota, Ed.Acodal,

que se escapan o nitratos y ácido clorhídrico que no son detectados como cloro residual y que por tanto hacen que vaya disminuyendo éste a medida que la dosis de cloro va aumentando (zona 2).

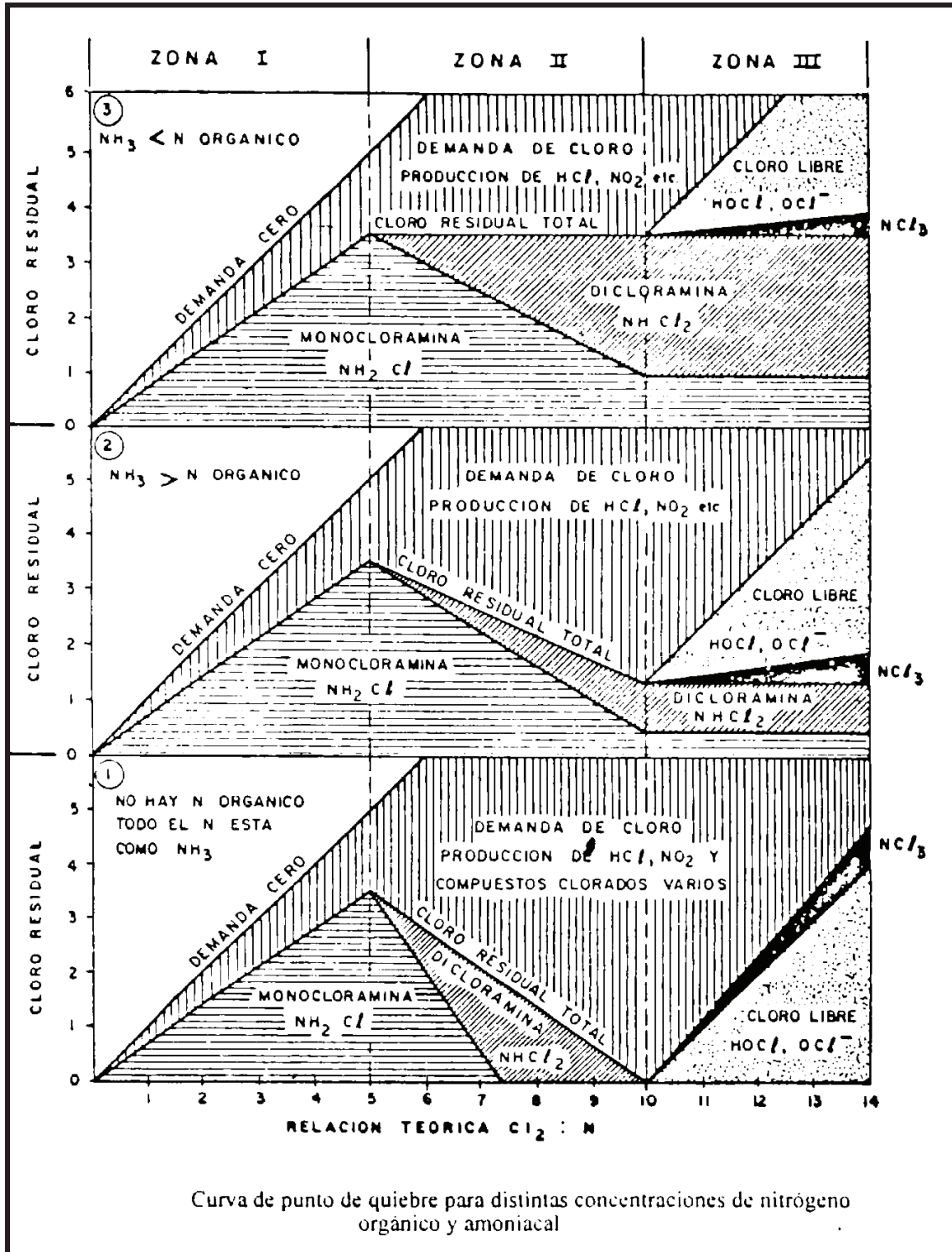


Figura 3-19: Punto de Quiebre

Fuente: Arboleda V. Jorge (1992)



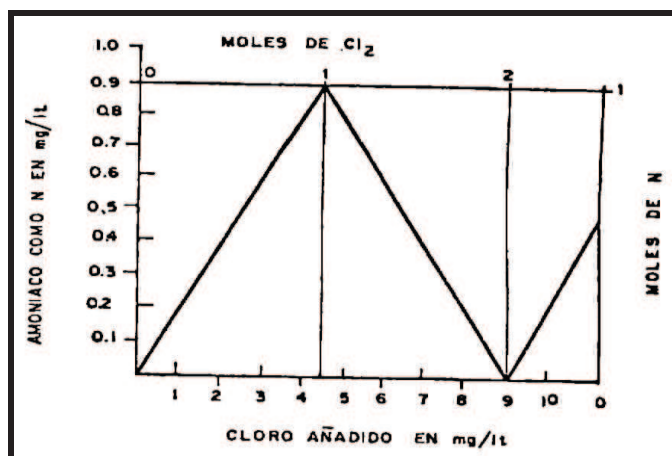
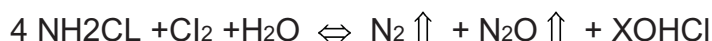


Figura 3-20: La Monocloramina

Fuente: Arboleda V. Jorge (1992)

Reacciones de este tipo pueden ocurrir durante la destrucción de las cloraminas:



Ecuación 3-28: Reacciones de destrucción cloraminas

Fuente: Arboleda V. Jorge (1992)

*Caso 3:* Si existe proporciones apreciables pero similares de nitrógeno orgánico el cloro residual en el punto de quiebre no desaparece completamente (véase figura 3-19), como en el caso anterior, sino que queda un remanente de  $\text{NH}_2\text{Cl}$ ,  $\text{NHCl}_2$  y  $\text{NCl}_3$  que no es reducido por el cloro, aún por dosis altas. Por tanto la concentración de cloro libre que se forma después del punto de quiebre es en este caso menor que el que existe cuando hay amoníaco solo en el agua.

*Caso 4:* Si la concentración de nitrógeno orgánico es apreciable y mayor que la del nitrógeno amoniacal (véase figura 3-19), el cloro residual en el punto de quiebre es alto y la curva puede tener una pendiente casi continúa, pues se

forman notables cantidades de cloraminas que no desaparecen con el aumento de la dosis de cloro.

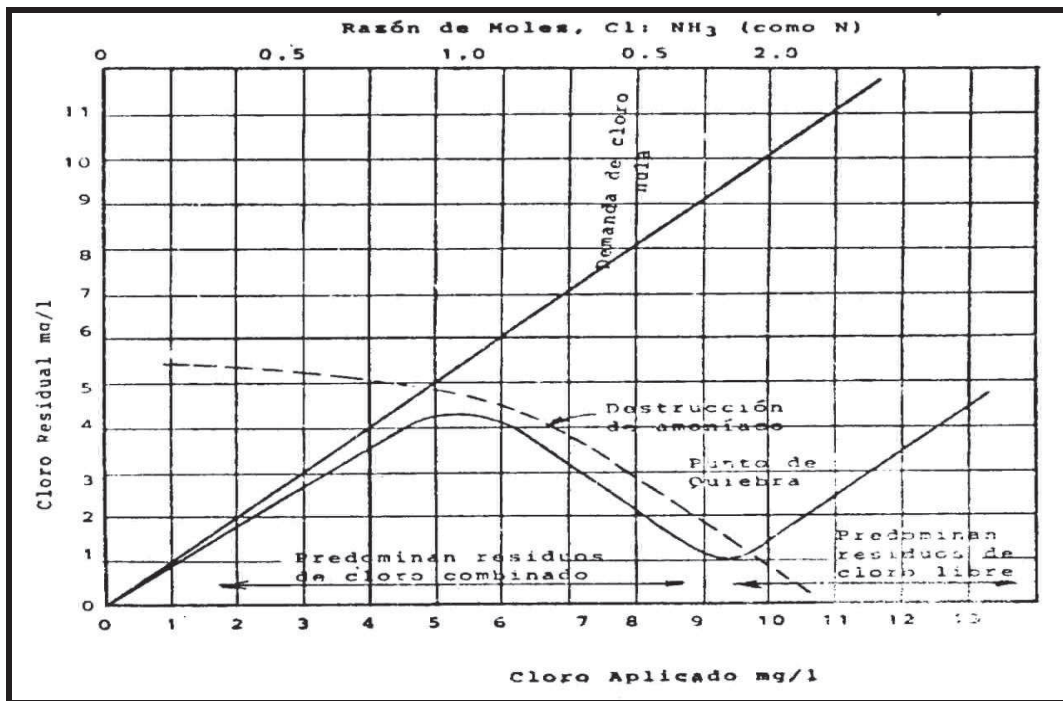
### 3.4.1.5 Cloración sobre el punto de quiebre

Como se ha explicado anteriormente, en caso de haber amoníaco en el agua se reacciona con el cloro para formar cloraminas, o cloro combinado. Experiencias han demostrado que al agregar cantidades mayores de cloro, éste actúa para oxidar y eliminar completamente las cloraminas mediante reacciones como la siguiente.



**Ecuación 3-29: Reacción sobre el punto de quiebre**

Fuente: Arboleda V. Jorge (1992)



**Figura 3- 21: Cloración sobre el punto de quiebre**

Fuente: Kirchner Cliff J. (1977)

En la figura 3-21 se presenta una curva de cloro libre como función del cloro agregado en un caso típico de “cloración sobre el punto de quiebre”<sup>39</sup>.

<sup>39</sup> Kirchner Cliff J., (1977). Desinfección, CEPIS, Lima

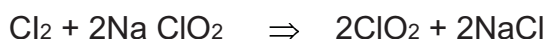
### 3.4.2 BIÓXIDO DE CLORO.

Al igual que el ozono, el bióxido de cloro no es utilizado comúnmente como desinfectante en América Latina, aunque es un desinfectante efectivo reconocido. Puesto que el bióxido de cloro es un oxidante poderoso, ha sido utilizado para controlar olores y sabores fenólicos. También ha sido utilizado para controlar olores y sabores causados por el crecimiento excesivo de algas y la descomposición de vegetación en reservorios<sup>40</sup>. Las comparaciones de bióxido de cloro y el cloro como desinfectantes, con dosis menores de 1.0 mg/l, demuestran algunas de las características beneficiosas de bióxido de cloro.

El bióxido de cloro es un poco menos efectivo como desinfectante que el cloro a un pH de 6.5 pero al aumentar a un pH mayor a 7, el bióxido de cloro mantiene su poder desinfectante, mientras que el ácido hipocloroso se disocia al ión hipoclorito, que es un desinfectante menos efectivo.

Debido a que es inestable y potencialmente explosivo, el bióxido de cloro no puede ser transportado. En consecuencia, es necesario generarlo en el sitio de uso. El clorito de sodio acuoso reacciona con cloro para formar bióxido de cloro. De acuerdo con el control del generador. Se ha informado también de la presencia de clorato. Para evitar explosiones debe mantenerse una concentración de ClO<sub>2</sub> inferior al 10% en el aire y a 30 gr/l en el agua<sup>41</sup>.

En la actualidad, debido a su carácter explosivo, dicho gas no se transporta, sino que se produce en el sitio donde se piensa aplicar, por medio de la cloración de clorito de sodio así:



**Ecuación 3-30: Reacción del Bióxido de Cloro**

**Fuente: Jorge Arboleda Valencia, (1992)**

---

<sup>40</sup> Cliff J. Kirchmer, Desinfección, CEPIS, Lima, 1977

<sup>41</sup> Jorge Arboleda Valencia, (1992) Teoría y Práctica De La Purificación del agua, Bogota, Ed.Acodal,

Los equipos de cloro utilizados son los mismos que para la cloración pero debe agregarse el generador de ClO<sub>2</sub>. (Véase en la figura 3-26).

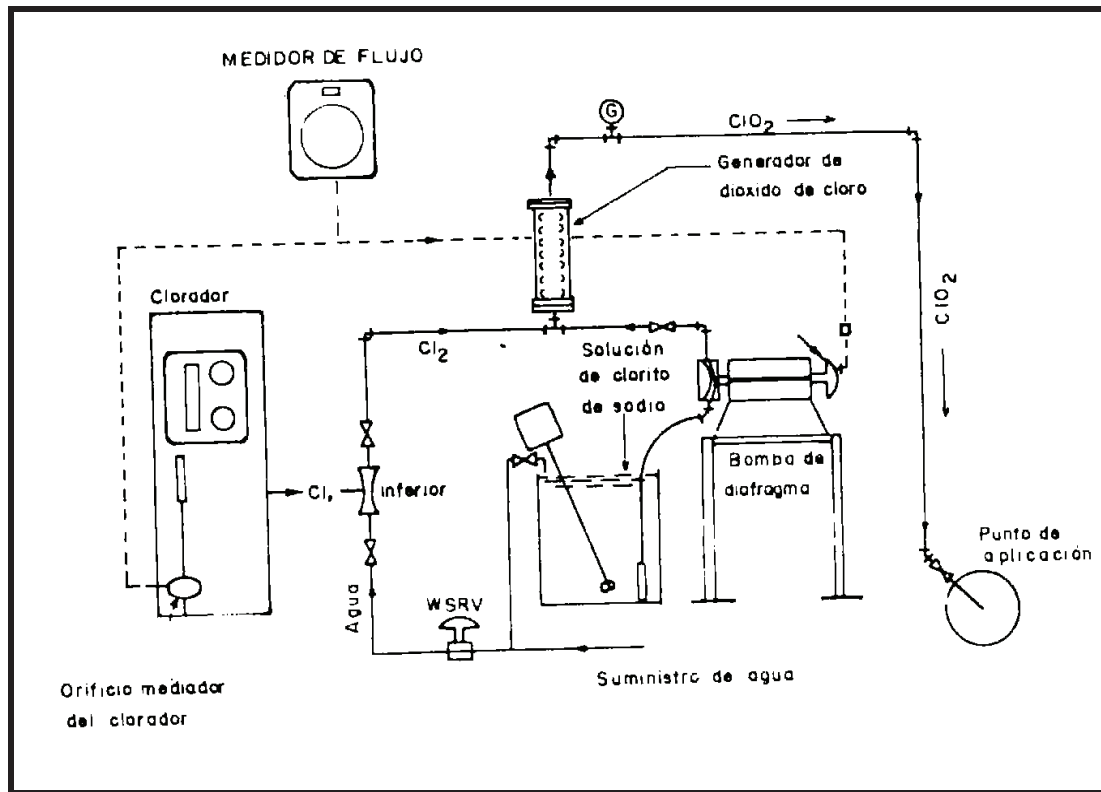


Figura 3-22: Generador de ClO<sub>2</sub>

Fuente: Jorge Arboleda Valencia, (1992)

Los problemas relacionados con el uso del bióxido de cloro son relacionados con los subproductos y productos finales. No se conoce todavía la naturaleza de los compuestos orgánicos formados. El uso de bióxido de cloro disminuye la formación de cloroformo y otros trihalometanos (THMs) si se controla bien el proceso, pero se desconoce si otros compuestos tóxicos o carcinogénicos son formados con subproductos en la reacción con aguas naturales.

### 3.4.3 CLORO GASEOSO

El cloro es un gas amarillo verdoso que, a presión, se convierte en líquido. El cloro líquido se puede adquirir en cilindros de acero presurizados que se surten en varios tamaños desde 40 o 100 Kg a 900 Kg. El flujo del gas cloro, desde el recipiente depende de la presión interna, que a su vez depende de la

temperatura del cloro líquido. Si la demanda de cloro requiere el uso de varios cilindros es preferible la conexión múltiple de los cilindros a un clorador en vez de proveer alimentadores separados para cada cilindro<sup>42</sup>.

El gas cloro es peligroso y corrosivo; por consiguiente se debe tener cuidado en el manejo de los recipientes. Nunca se deberá aplicar calor a los cilindros o válvulas e cloro. Los cilindros se deben almacenar en un lugar seco y protegidos del calor. En los países tropicales es importante que los cilindros de cloro y el equipo alimentador se protejan de los rayos del sol. El área de almacenamiento debe estar al aire libre, en caso de estar bajo techo, debe estar bien ventilada, preferentemente mediante ventilación forzada.

#### **3.4.4 COMPUESTOS DE HIPOCLORITO.**

Los hipocloritos de calcio y sodio y la cal clorada son los compuestos comúnmente utilizados. Las propiedades, almacenamiento y preparación de las soluciones de hipoclorito se discuten en varios textos (White, 1972; Cox, 1964; AWWA, 1971)<sup>43</sup>.

La elección del hipoclorito para una instalación particular se debe basar en el costo y disponibilidad. El cloro libre disponible en estos compuestos varía de 12 a 15% para el hipoclorito de sodio; de 33 a 37% para la cal clorada; y de 65 a 70% para los hipocloritos de calcio.

- a. Las cales cloradas son relativamente inestables; y la exposición al aire, luz y humedad provoca que el contenido de cloro disminuya rápidamente.
- b. Los hipocloritos de calcio son considerablemente más estables; en condiciones normales, pierden el año de tres a 5% del cloro libre disponible.
- c. El hipoclorito de sodio se usa mucho como oxidante en el proceso de potabilización del agua, a dosis ligeramente superiores al punto crítico (punto en que empieza a aparecer cloro residual libre).

---

<sup>42</sup> Schulz C. – Okun D., (1990) Tratamiento De Aguas Superficiales Para Países En Desarrollo. Ded. Noriega- Limusa, México,

<sup>43</sup> White Clifford, (1985). The handbook of chlorination. Segunda edición. De, VNR. Nueva York..

Las tabletas de hipoclorito de calcio necesitan de un alimentador de tableta de bajo costo<sup>44</sup>. El sistema consiste en tubos de alimentación para aplicar las tabletas, donde la ubicación es en medio del flujo principal de entrada, el mismo que lo atraviesa para proporcionar un control de dosificación constante y disuelve las tabletas automáticamente a través de los flujos efluentes. Este sistema no necesita bomba para empujar, inyector que pueda tapanla o bloquearse durante el funcionamiento, y ningún entrenamiento largo del operador. Está construido de materiales resistentes a la corrosión y durables, el alimentador de la tableta tiene dos o cuatro tubos limpios que sostienen las tabletas en un diámetro de 2 5/8 de pulgada.

Volumen del cloro, min.	70%
Forma del producto	Tableta
Dimensiones	2 5/8" de diámetro y 13/162" espesor
Peso, aprox.	5 onzas
Densidad	83 lb./pie <sup>3</sup>

**Tabla 3-8: Tabletillas de Hipoclorito de Calcio**

**Fuente: Exceltec International Corporation. (2009)**

Ventajas adicionales:

- Forma de la tableta Grande: Más estable. Menos arriesgado que en forma granular. Fácil manejo.
- Controlada proporción de Disolución.
- Alta pureza de las tabletas: Cantidad baja de sólidos.
- Larga vida del Estante.
- Alto Concentración del cloro: Mínimo del 70%. Menos químico para el mismo trabajo.
- Sistema completo para desinfección
- Funcionamiento automático
- Dosificación del cloro controlada
- Funcionamiento a largo plazo

<sup>44</sup> Derry, T.K. y WILLIAMS, Trevor I. (1977). Historia de la Tecnología. 3. Desde 1750 hasta 1900. MADRID.

- Eliminación de gases tóxicos
- Eliminación de soluciones voluminosas, poder eléctrico y el requerimiento extra de agua
- Ningún equipo caro como bombas, tanques y medidores de flujo
- Ninguna parte móvil para sacar o remplazar
- Mínimos costos de mantenimiento y operación

### 3.4.5 PRODUCCIÓN EN LA PLANTA. (ELECTROLISIS)

El primer proceso electrolítico para la producción de cloro fue patentado en 1851 por Charles Watt en Gran Bretaña. En 1868, Henry Deacon produjo cloro a partir de ácido clorhídrico y oxígeno a 400 °C (750 °F), con cloruro de cobre impregnado en piedra pómez como catalizador. Las celdas electrolíticas modernas pueden clasificarse casi siempre como pertenecientes al tipo de diafragma y de mercurio. Ambas producen sustancias cáusticas (NaOH o KOH), cloro e hidrógeno. La política económica de la industria del cloro y de los álcalis incluye principalmente la mercadotecnia equilibrada o el uso interno del cáustico y del cloro en las proporciones en las que se obtienen mediante el proceso de la celda electrolítica<sup>45</sup>.

El cloro se fabrica comercialmente mediante la electrólisis de salmuera, principalmente en celdas de diafragma. El cloro se desprende como gas caliente en el ánodo; y el cátodo se genera hidrógeno junto con un subproducto cáustico que resulta de la electrólisis de la solución de salmuera. Un diafragma separa el catalito del anolito como se muestra en la figura 3-27 el esquema de una típica celda de diafragma. Los materiales requeridos para la regeneración en la planta de hipoclorito son: salmuera, agua y energía eléctrica.

La salmuera y el agua deben estar relativamente libres de impurezas para reducir el problema de obstrucciones en el diafragma de la celda. Además, se deben evitar las altas concentraciones de nitrógeno amoniacal en la solución

---

<sup>45</sup> Cáceres O., (1971). "Manual para la desinfección de agua mediante cloración". Peru, Ministerio de salud, Dirección General de Servicios Integrados de Salud,

de salmuera ya que esto puede conducir a la acumulación de tricloruro de nitrógeno en los cilindros de cloro. El tricloruro de nitrógeno es una sustancia extremadamente volátil, que puede explotar repentinamente y romper los cilindros.

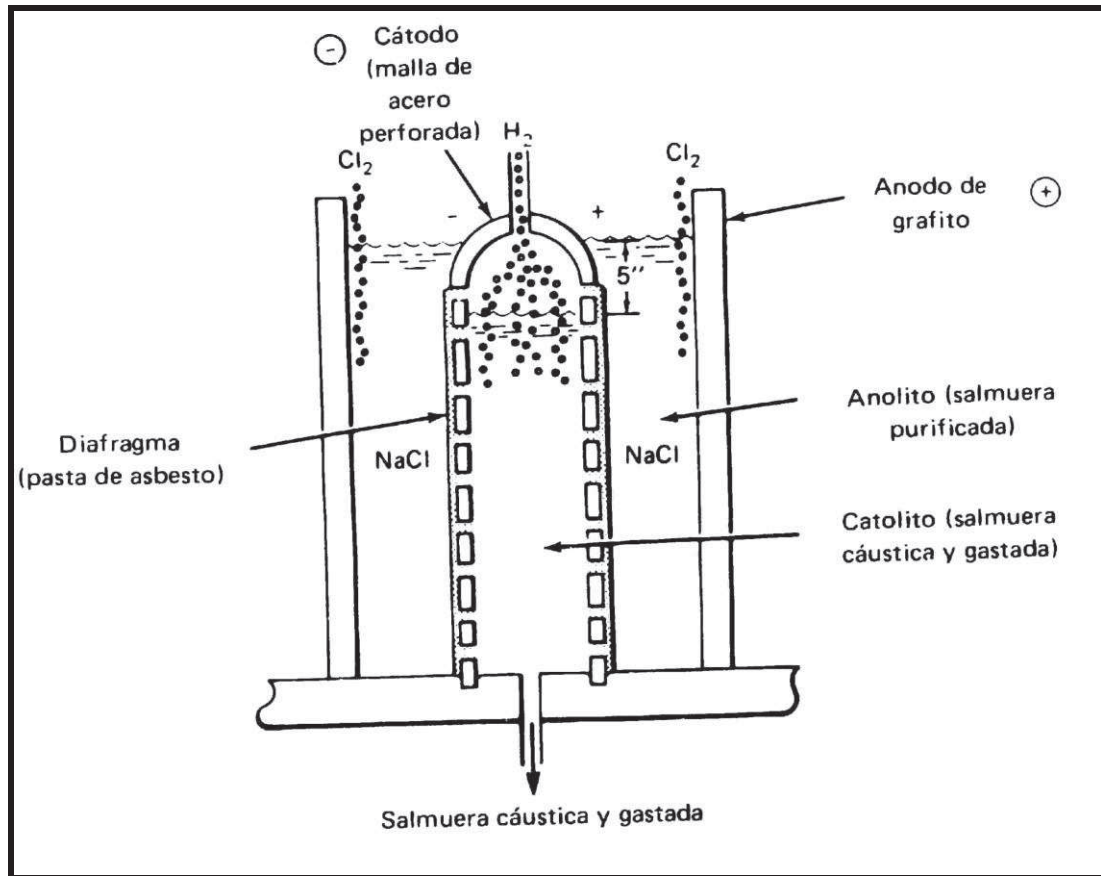


Figura 3-23: Esquema de una celda de Diafragma

Fuente: Cáceres O., (1971)

Las concentraciones altas de nitrógeno amoniacal en la salmuera se puede evitar, cuando tienden a ocurrir, mediante la sobrecloración del agua que se utiliza en el proceso a fin de convertir el nitrógeno amoniacal en tricloruro de nitrógeno, seguida de aireación para purgar este compuesto volátil antes de utilizar el agua para la producción de salmuera.

En la Tabla 3-9 se muestran los requerimientos de energía y sales para generación en una planta de hipoclorito según informes de diferentes fabricantes de E.E.U.U.



	Energía	Sal
	Kw h/lb de Na	lb/lb de NaOCl
Ionics "Colormat"	1,7	2,1
Engelhard "Choropac"	2,8	(Agua de mar)
Pepcon "Pep - Clor"	3,5	3.25
Diamond Shamrock "Sanilec"	2,5	3,05

Tabla 3-9: Comparación de requerimientos de Energía

Fuente: Jorge Arboleda Valencia, (1992)

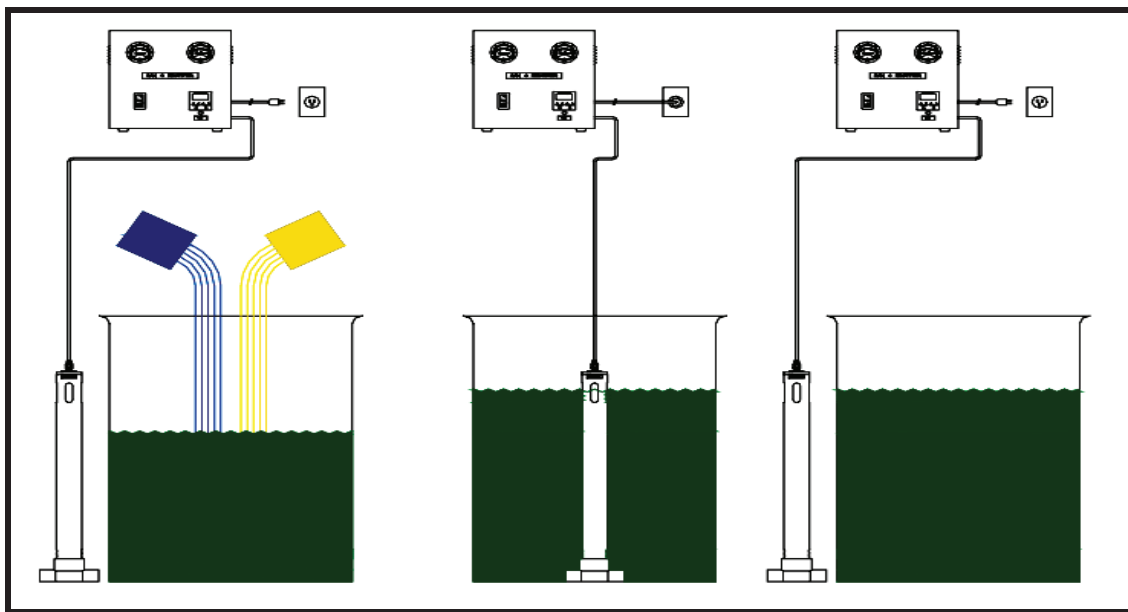


Figura 3-24: Generación de cloro por electrólisis

Fuente: Exceltec Internacional Corporation,(2009)

El transformador está diseñado para trabajar con voltaje ajustable de entrada, permitiendo que la energía sea predispuesta para optima operación. El interruptor de perilla tap-switch, permite los ajustes ideales de voltaje con la corriente apropiada para maximizar la salida de la celda y la eficiencia eléctrica<sup>46</sup>.

La operación es muy simple. Se agrega sal y agua al tanque en cantidades que se indican en la tabla, se sumerge la celda en el tanque y se conecta la electricidad al rectificador, cuando el ciclo de producción se completa, se desconecta el rectificador y se remueve la celda.

<sup>46</sup> Exceltec Internacional Corporation,(2009). Manual de Usuario SANILEC6®,

Características de los Equipos de Electrolisis:

- Ligero, Extremadamente portátil.
- Seguro y fácil de operar.
- Requerimientos: un tanque estándar, sal, agua limpia y energía eléctrica.
- La celda se puede limpiar rápidamente con vinagre domestico.
- Principio de operación basada en la tecnología electrónica ya probada.
- Cada día esta tecnología produce más de un millón de libras de cloro equivalente alrededor del mundo.

**TABLA DE PRODUCCIÓN CONSUMOS DE SAL Y AGUA**

Volumen de agua	Sal Requerida (30 gramos / litro)	Ciclo de Operación	Cloro Disponible Producido
80 Litros	2.4 Kilogramos	4 Horas	0.5 Kilogramos
100 Litros	3 Kilogramos	5 Horas	0.63 Kilogramos
166 Litros	5 Kilogramos	8 Horas	1.0 Kilogramos
200 Litros	6 Kilogramos	9 Horas	1.1 Kilogramos
300 Litros	9 Kilogramos	12 Horas	1.5 Kilogramos

**Tabla 3-10: Producción de Cloro por Electrolisis**

Fuente: Exceltec Internacional Corporation,(2009)

### 3.5 OTROS DESINFECTANTES QUÍMICOS.

#### 3.5.1 YODO

Presión de Vapor (mbar)	0,28
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	4,93
Punto de ebullición (°C)	183
Punto de Fusión (°C)	114

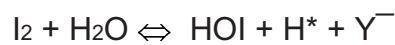
**Tabla 3-11: Propiedades del yodo**

Fuente: Merck, (2006)

En lo últimos años se ha venido hablando de yodo como posible alternativa para el cloro. Chang y Morris, Black y otros<sup>47</sup> han realizado estudios sobre la

<sup>47</sup> Chang, S.L.& Morris, J.C., (1953). "Elemental iodine as a disinfectant for drinking water". Ing. Eng.Chen. 45:1009,

yodación. El I<sub>2</sub> es el alógeno de mayor peso atómico y que por su bajo poder de oxidación resulta ser más estable. Sus residuales por eso se conservan por mucho más tiempo que los del cloro. El yodo no forma yodaminas con el amoníaco. Si bien no reacciona con los fenoles como el cloro, el I<sub>2</sub> produce un sabor medicinal en el agua en concentraciones mayores a 1 mg/l. Un estudio realizado en Chile por Unda y sus colaboradores<sup>48</sup> demostró que concentraciones por debajo de 0.5 mg/l son aceptables para la mayoría de los consumidores. El yodo al mezclarse con agua se disocia formando ácido hipoyodoso HOI. Así:



**Ecuación 3-31: Reacción del yodo**

Fuente: Chang, S.L. & Morris, J.C., (1953)

$$I / HOI = K$$

**Ecuación 3-32: Constante del Ácido Hipoyodoso**

Fuente: Chang, S.L. & Morris, J.C., (1953)

El valor de K depende del pH y la concentración, como lo muestra la figura 3-25.

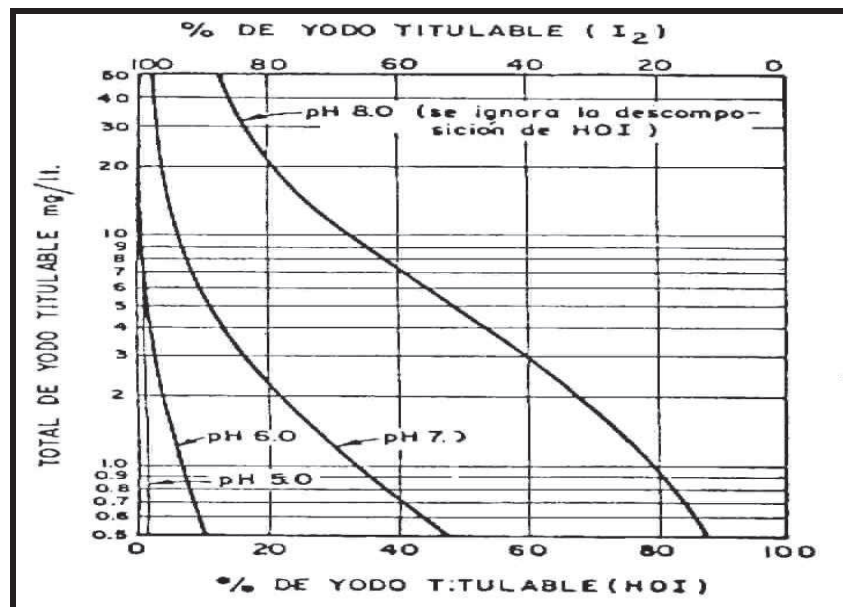


Figura 3-25: % HOI vs. %I<sub>2</sub>

Fuente: Chang, S.L. & Morris, J.C., (1953)

<sup>48</sup> Unda, F. y Colaboradores. . (1968). Yodación de agua potable, experiencia chilena. Trabajo presentado al XI Congreso Interamericano de Ing. San

Una dosis de 0.5 mg/l según Chang<sup>49</sup>, produce la muerte de 99.99% de E Coli en un minuto, lo cual se compara ventajosamente con el cloro, dado que el yodo resulta igualmente eficiente para destruir coliformes, más efectivo para matar amibas y un poco menos para inactivar virus. Véase la figura 3-26.

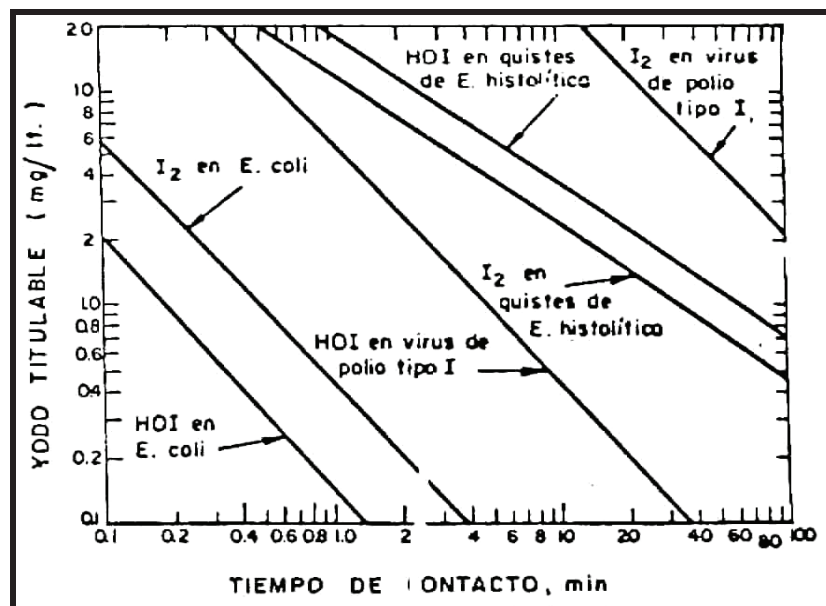


Figura 3-26: Desinfección del yodo

Fuente: Chang, S.L. (1968)

El estudio realizado por Black<sup>50</sup> en diferentes instituciones del Estado de Florida, y que se realizó por un lapso de 43 meses, mostrando que la mayor dificultad en su uso está en el precio pues en varias veces más costoso que el cloro y por los efectos fisiológicos que produce su ingestión continuada, en especial en el funcionamiento de la tiroides y el corazón.

#### a. Desinfección Con Tintura De Yodo En Aguas Claras.

En un estudio realizado por Muñoz y colaboradores (1992)<sup>51</sup> la dosis de yodo recomendada es de 1 gota de yodo por litro de agua a desinfectar. Se puede decir que la dosis óptima de yodo para este tipo de aguas está en rededor de 0,6 gotas por litro con lo que se asegura presencia de yodo residual y 0 de conteaje de coliformes fecales.

<sup>49</sup> Chang, S.L. (1968). "Waterborne viral infections and their prevention". Vol. OMS,

<sup>50</sup> Black, A.P., et al (Ene. 1968). "Iodine for disinfection of water". J. AWWA, 60:69,

<sup>51</sup> Muñoz M. – Balarezo A., (1992). Métodos alternos de desinfección de agua para bebida y preparación de alimentos en el área rural, Ed. EPN-FIC, Quito,

### b. Desinfección con tintura de yodo en Aguas turbias.

La dosis de yodo está alrededor de 1,7 gotas por litro con tiempos de contacto de 30 min (70% más de lo recomendado)<sup>52</sup>. Con lo que se logra asegurar la desinfección al tener 0 CF/100ml y presencia de yodo residual, se debe notar que las dosis de yodo aplicada a este tipo de aguas incrementan el color, en el agua y por otro lado generan olor y sabor característicos de este oxidante.

### 3.5.2 BROMO.

Nombre	Bromo
Número atómico	35
Valencia	+1,-1,3,5,7
Estado de oxidación	-1
Electronegatividad	2,8
Radio covalente (Å)	1,14
Radio iónico (Å)	1,95
Radio atómico (Å)	-
Configuración electrónica	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup>
Primer potencial de ionización (eV)	11,91
Masa atómica (g/mol)	79,909
Densidad (g/ml)	3,12
Punto de ebullición (°C)	58
Punto de fusión (°C)	-7,2
Descubridor	Anthoine Balard en 1826
Presión de Vapor (mbar)	220
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	3,12
Punto de ebullición (°C)	58,8
Punto de Fusión (°C)	-7,2

Tabla 3-12: Propiedades del Bromo

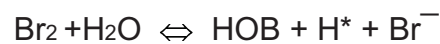
Fuente: Merck, (2006)

<sup>52</sup> Merck, (2006). Ficha con datos de seguridad, Darmstadt Alemania,

Es el único elemento no metálico líquido a temperatura y presión normales. Es muy reactivo químicamente; elemento del grupo de los halógenos, sus propiedades son intermedias entre las del cloro y las del yodo. Si bien la eficiencia del bromo es comparable a la del cloro y el yodo en la destrucción de microorganismos, su costo es más alto que el de dichos compuestos y su manejo crea problemas. Por eso su uso se ha limitado a la desinfección de piscinas que produce menor irritación de los ojos que el cloro.

Líquido de color rojo pardo con olor penetrante que precisa protección personal para su manipulación. Tiene una toxicidad aguda probada en ratas  $DL_{50}$  (oral) = 2600 mg/Kg y  $CL_{50}$  (inhalativo) = 2700 mg/Kg, en la comprobación de la sustancia no se encontraron todavía investigaciones sobre la cuestión de posibles efectos teratógenos. El bromo, al igual que los otros halógenos, tienen propiedades desinfectantes, reacciona con el amoníaco para formar brominas y presenta un fenómeno de punto de quiebre a una relación teórica.

Al hidrolizarse en el agua forma ácido hipobromoso:



### **Ecuación 3-33: Reacción del ácido Hipobromoso**

**Fuente: Jorge Arboleda Valencia, (1992)**

El producto debe manejarse con las precauciones apropiadas para los productos químicos. Dosis para organismos acuáticos e hidrológicos que es tóxico  $CL_{50} > 10$  mg/l en 96 horas; toxicidad para los peces  $CL_{50} < 20$  mg/l y *Daphnia magna*  $CE_{50} = 1.5$  mg/l en 24 horas. El bromo causa daño a la piel en forma casi instantánea y es difícil de eliminar rápidamente para que no provoque quemaduras dolorosas que sanan con lentitud.

Los efectos sobre la salud más importantes que pueden ser causados por contaminantes orgánicos que contienen bromuros son disfunciones del sistema nervioso y alteraciones del material genético. Pero los bromuros orgánicos pueden también dañar ciertos órganos como el hígado, riñones, pulmones y testículos y puede causar disfunciones estomacales y gastrointestinales. Sus

vapores son muy tóxicos, pero su olor sirve como aviso; es difícil permanecer en un área de suficiente concentración para ser dañado en forma permanente. El bromo puede manejarse con seguridad, pero deben respetarse las recomendaciones de los fabricantes.<sup>53</sup>

### 3.5.3 NITRATO DE PLATA.

Valor de pH (100 g/l H <sub>2</sub> O)	5,4 – 6,4
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	4,35
Punto de ebullición (°C)	444
Punto de Fusión (°C)	212

**Tabla 3-13: Propiedades del Nitrato de Plata**

**Fuente: Lenntech, (2009)**

El nitrato de plata es una sal inorgánica, cuya fórmula es AgNO<sub>3</sub>, comercialmente se vende en polvo, se trata de un polvo blanco amarillento, pero normalmente se utiliza en disolución. Las concentraciones son de 50 a 500 p.p.m. Este compuesto es muy utilizado para detectar la presencia de cloruro en otras soluciones. Cuando está diluido en agua, reacciona con el cobre formando nitrato de cobre, se filtra y lo que se queda en el filtro es plata.

Aunque la plata es el metal noble más activo químicamente, no es muy activa comparada con la mayor parte de los otros metales. No se oxida fácilmente (como el hierro), pero reacciona con el azufre o el sulfuro de hidrógeno para formar la conocida plata deslustrada. El galvanizado de la plata con rodio puede prevenir esta decoloración. La plata no reacciona con ácidos diluidos ni oxidantes (ácidos clorhídrico o sulfúrico) ni con bases fuertes (hidróxido de sodio).

En la farmacopea de numerosos países el nitrato de plata, junto con la propia plata, se utiliza como antiséptico y desinfectante aplicado por vía tópica. Se encuentra incluido dentro del grupo D08 del código internacional ATC,

---

<sup>53</sup> Lenntech, (2009). Disinfection with Bromine.  
<http://www.lenntech.com/processes/disinfection/chemical/disinfectants-bromine.htm>

concretamente con el código D08AL01.<sup>54</sup> También se utiliza como cauterizante en hemorragias superficiales o para refrescar úlceras encallecidas. Se utiliza en citoquímica para teñir el retículo endoplasmático rugoso.

Los iones de plata son un desinfectante utilizado en algunos países europeos esencialmente en plantas de purificación para usos industriales. El sistema conocido como Katadyn si bien es más caro que la cloración, deja efectos residuales. Algunas veces se le utiliza en filtros domésticos de porcelana porosa con relativo éxito.

Para compuestos de plata en general produce efectos biológicos tales como: Los iones de plata son tóxicos para organismos acuáticos, bacterias *Ps. Putida* en dosis de 0.006 mg/l, protozoos *U. Parduczi* en dosis desde 0.01 mg/l, artrópodos *Dafnia magna*  $EC_{50} = 0.004$  mg/l, Algas *M. Aeruginosa* dosis de 0.0007 mg/l y cuadrada toxica desde 0.009 mg/l. Pueden favorecer la eutrofia de acuíferos y las dosis para organismos acuáticos e hidrológicos que es tóxico (peces)  $CL_{50} > 500$  mg/l.<sup>55</sup>

Tiene una toxicidad aguda probada en ratones  $DL_{50}$  (oral) = 50 mg/Kg, para compuestos solubles de plata es poco absorbible a través del tracto intestinal, produce fuerte irritación tras contacto con los ojos y la piel. Debido a la ingesta produce trastornos en el tracto gastrointestinal. Las sales solubles de plata, especialmente el nitrato de plata ( $AgNO_3$ ), son letales en concentraciones de hasta 2 gr. Los compuestos de plata pueden ser absorbidos lentamente por los tejidos corporales, con la consecuente pigmentación azulada o negruzca de la piel (argüiría). El nitrato de plata se emplea como caustico y cicatrizante. Disuelto en una solución al 1%, sirve como preventivo oftálmico para los recién nacidos y al 2% resulta útil para tratar el eccema húmedo. Es frecuente emplearlo como antiséptico local en pomadas que contienen 15% de plata coloidal. Hasta hace poco era común hallarlo en las farmacias en forma de lápiz o barrita para eliminar verrugas y mezquinos en la piel.

---

<sup>54</sup> ATC 2008 Index WHO. Collaborating Centre for Drug Statistics Methodology del Instituto Noruego de Salud Pública

<sup>55</sup> Chambers, C.W.; Chambers, L.A. & Kabler, P., "New Colloidal silver deesinfectant". Industrial Eng. Chem., 45:2569, (Nov. 1953).



La sobreexposición crónica a uno ó varios componentes de la plata con concentraciones de 50 a 500 ppm tiene los siguientes efectos en los humanos<sup>56</sup>:

- Anormalidades cardiacas.
- Se ha informado de la relación entre sobre-exposiciones repetidas y prolongadas a disolventes con daños cerebrales y del sistema nervioso permanentes.

#### 3.5.4 PLATA IONIZADA.

Nombre	Plata
Número atómico	47
Valencia	1
Estado de oxidación	+1
Electronegatividad	1,9
Radio iónico (ηm)	0,126
Radio atómico (ηm)	0,144
Configuración electrónica	[ Kr ] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup>
Primer potencial de ionización (Kj/mol)	758
Segundo potencial de ionización (Kj/mol)	2061
Potencial estándar	0,779 V (Ag <sup>+</sup> /Ag)
Masa atómica (g/mol)	107,87 g.mol <sup>-1</sup>
Densidad (g/cm <sup>3</sup> a 20°C)	10,5
Punto de ebullición (°C)	2212 °C
Punto de fusión (°C)	962 °C
Descubridor	Los antiguos
pH	6,5

**Tabla 3-14: Propiedades de la Plata**

**Fuente: Merck, (2006)**

<sup>56</sup> Chambers, C.W.; Chambers, L.A. & Kabler, P., (Nov. 1953). "New Colloidal silver disinfectant". Industrial Eng. Chem., 45:2569,

La plata fue usada como un bactericida efectivo desde el año 1900, ha sido un apoyo importante en el tratamiento médico. Henry Crooks demostró que la plata coloidal es altamente germicida y al mismo tiempo no tóxica para los humanos. Con pH=6.5 la concentración segura es de 3 a 5 mg/l<sup>57</sup>.

El término coloide se refiere a una sustancia que consiste en partículas ultra finas dentro del rango de 0.005 a 0.015 micrones de diámetro y permanecen suspendidas, ya que están eléctricamente cargadas. Se ha comprobado que la plata coloidal es útil contra todas las especies de hongos, bacterias, protozoarios, parásitos y ciertos virus. Generalmente un antibiótico mata alrededor de 6 bacterias pero la plata coloidal mata aproximadamente 650. Las cepas resistentes a la plata coloidal no se desarrollan como lo hacen con los antibióticos. Becker, descubrió que los iones de plata promueven el crecimiento óseo y matan a las bacterias circunvecinas<sup>58</sup>.



**Figura 3-27: Generador de Plata Coloidal**

**Fuente: Biomagnetix, (2009)**

La plata ionizada desactiva la bacteria Legionella pneumophila, biofilm y mejora la calidad del agua. Tiene un efecto a largo plazo mayor que la mayoría de los desinfectantes. Los iones de cobre y plata se mantienen en el agua por mucho tiempo. Debido a su efectividad local los efectos son mayores que los sistemas UV.

<sup>57</sup> Simonetti N. et al. (1997), Electrochemical Ag<sup>+</sup> for Preservative Use, Applied and Environmental Microbiology, American Society for Microbiology, Washington, USA, Vol. 58

<sup>58</sup> Becker R. & Selden G., (2006), The Body Electric, Electromagnetism and Foundation of Life, San Francisco Chronicle, USA, 163: 181

La plata ionizada es efectiva en todo el sistema de agua incluso en partes donde el agua está estancada y no hay movilidad. La efectividad de La plata ionizada no depende de la temperatura. Cuando se utiliza este sistema se requiere un menor mantenimiento en el sistema del agua. Debido a una disminución en el uso de químicos, las partes superiores/tapas y bombas no son dañadas, e incluso las cabezas de las duchas, tanques y recubiertas no se contaminan. Con ionización cobre- plata no existen dificultades de transporte y almacenamiento.

La efectividad del método de ionización cobre- plata es dependiente del pH. A pH de 9 solo un décimo de la bacteria de Legionella pneumophila consigue ser eliminada. Cuando la concentración de sólidos disueltos es alta, la plata precipita. Esto significa que los iones de plata no están disponibles para la desinfección.

Los iones de plata reaccionan fácilmente con los cloros y nitratos presentes en el agua, causando que estos no sean efectivos. Algunas especies de microorganismos se vuelven resistentes a los iones de plata. Pueden eliminar metales de su sistema o convertirse en un producto menos toxico. Estos microorganismos pueden ser resistentes a la ionización cobre- plata.

Existen comentarios de que la bacteria Legionella pneumophila puede desarrollar resistencia en la ionización plata, sin embargo es un hecho que es efectiva contra la bacteria Legionella pneumophila.

Para matar microorganismos patógenos de manera efectiva, los iones plata deben estar presentes en el sistema completo del agua. Cuando el sistema no es muy utilizado, y el flujo del agua es muy lento, o cuando existen puntos muertos en el sistema, esto puede suponer un problema para la desinfección. Aunque la plata no se oxida cuando se calienta, puede ser oxidada química o electrolíticamente para formar óxido o peróxido de plata, un agente oxidante poderoso. Por esta actividad, se utiliza mucho como catalizador oxidante en la producción de ciertos materiales orgánicos.

### 3.5.5 OZONO.

En el año 1758, M. Von Marum, investigando con máquinas electrostáticas, observo la presencia de un olor característico, fenómeno que hizo constar en sus conclusiones. Si bien fueron muchos los científicos que trataron de determinar sus características, sólo M. P. Otto fue el que logró determinar su densidad, peso molecular, etc., logrando además producirlo y controlarlo artificialmente. Siemens, en 1857, construyó el primer generador de ozono por efluvo eléctrico. El ozono en la actualidad, tanto por su costo como por su eficiencia como desinfectante, el más serio competidor del cloro.

#### 1. Propiedades del Ozono

Peso Molecular	48
Densidad (gr/l)	2144
Densidad (líquido a -182 °C) (gr/cm <sup>3</sup> )	1572
Punto de Ebullición (°C)	-112,6
Punto de Congelación (°C)	-249,7
Temperatura de Condensación (°C)	-112
Temperatura de Crítica (°C)	-12.1
Temperatura de Fusión (°C)	-192.5
Presión Crítica (atm)	54
Peso del litro de gas (a 0 °C y 1 atm)	2.144
Potencial de óxido – reducción O <sub>3</sub> (V)	2.07

**Tabla 3-15: Propiedades del Ozono**

**Fuente: Jorge Arboleda Valencia (1992)**

El ozono es una forma alotrópica del oxígeno. Su molécula, O<sub>3</sub>, se produce a partir de la activación de la molécula de oxígeno, según la reacción endotérmica:



**Ecuación 3-34: Reacción del ozono**

**Fuente: Jorge Arboleda Valencia (1992)**

La fórmula propuesta por Laury y Lewis, basada en los llamados enlaces semipolares, permite entender las propiedades atribuidas al ozono, en su acción frente a otros compuestos químicos. Bastan concentraciones pequeñas de ozono, (del orden de los 0.2 mg O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> de aire) para poder comprobar las ventajas que ofrece

En el agua presenta gran solubilidad, medida está por el coeficiente del equilibrio entre la fase líquida y la fase gaseosa para unas mismas condiciones de presión y temperatura:

$$K = c_1 / c_2$$

**Ecuación 3-35: Coeficiente de equilibrio K**

**Fuente: Jorge Arboleda Valencia (1992)**

En donde,

C<sub>1</sub>= Concentración de ozono en fase líquida (mg/l)

C<sub>2</sub>= Concentración de ozono en fase gaseosa (mg/l)

No obstante el equilibrio solo se alcanza en el momento en que todas las materias reductoras existentes en que dichas fases se han oxidado. Queda siempre una parte del ozono en el agua, siempre que nosotros estemos aportando ozono para neutralizar la acción de materias reductoras que se puedan ir formando, y que el agua este purificada y apta para el fin a la cual se ha destinado

En condiciones normales de presión y temperatura, el ozono es inestable; aumentando dicha inestabilidad por aumento de temperatura y humedad, llegando a ser total por encima de los 200 °C.

Después de lo anteriormente expuesto podemos decir que el ozono es:

- ✓ Después del flúor, el compuesto más oxidante, debido a su capacidad de captar electrones.
- ✓ De fácil descomposición.
- ✓ Es 1.3 veces más pesado que el aire.

- ✓ En estado gaseoso es ligeramente azul; azul oscuro en fase líquida y rojo oscuro en fase sólida.
- ✓ Presenta estructura molecular típicamente angular entre los átomos de oxígeno que componen la molécula.
- ✓ A igualdad de condiciones, es más estable en el agua que en el aire

## **2. Producción Natural del Ozono**

El ozono, compuesto derivado del oxígeno, se encuentra en la atmósfera en pequeñas proporciones. Su formación natural es debido a la acción de las descargas eléctricas que se producen en la atmósfera, así como por rayos ultravioletas procedentes del sol, frente al oxígeno existente en la atmósfera.

Se halla en la naturaleza en menor o mayor proporción, dependiendo esta del grado de purificación del ambiente. Así, podemos percibir su olor penetrante en los espacios libres acentuándose sobre todo después de las tormentas donde se ha producido gran aparato eléctrico.

Por tanto el ozono es uno de los contribuyentes vitales de la atmósfera, donde una capa de ozono denominada "ozonósfera", actúa como un verdadero filtro; de manera que las radiaciones ultravioletas irradiadas por el sol alcanzan la tierra con solo una millonésima parte de su acción ya que de lo contrario sería fatal para los seres vivos que pueblan en la tierra.

## **3. Formación Artificial del Ozono**

La obtención del ozono se puede realizar por procedimientos físicos – químicos, a saber:

- ❖ Por electrolisis del ácido perclórico concentrado a  $-50^{\circ}\text{C}$  entre cátodo de plomo (Pb) y ánodo de platino (Pt). Este procedimiento no es rentable desde el punto de vista industrial y mucho menos doméstico
- ❖ Por lámparas ultravioletas entre longitudes de onda de  $1.942$  a  $1.949\Delta$ . Este sistema de obtención de ozono no es recomendable ya aunque al movernos

en longitudes de onda muy corta, sus radiaciones son semejantes a las producidas por los rayos X emisores de fotones, los cuales actúan sobre los tejidos vivos provocando su destrucción.

Además, es normal que al ser un proceso radiactivo se produzcan gran exceso de calor; con el costo adicional que supone el evacuar grandes masas de calor. Es aquí donde se demuestran las grandes ventajas de los sistemas de producción, que se llaman en frío por ser a temperaturas normales, y sobre todo como demuestran los exhaustivos análisis, no producen ningún tipo de partículas radiactivas.

Según lo expuesto, el oxígeno naciente (monoatómico) formado por descomposición del ozono es el elemento más oxidante después del flúor (F). A esta acción de oxidación debe su poder de ozono, destruyendo sustancias orgánicas productoras de olores, aniquilando a la vez bacterias, virus y gérmenes de todo tipo.

#### **4. Formas de Actuación**

El ozono realiza su acción destructora de tres formas:

- A. Acción oxidante en la cual, interviene un solo átomo de oxígeno, (potencial de oxidación  $E_0=1.5v.$ )
- B. Por ozonólisis, con formación de ozonuros ( $HO_3$ ). Interviene en este caso la molécula entera de ozono sobre las sustancias orgánicas. Estos ozonuros son muy inestables destruyendo en compuestos distintos al de la molécula orgánica que intervino en su formación.
- C. Catalizando el efecto oxidante del oxígeno,  $O_2$ , que no ha intervenido en la formación del ozono, en este caso el oxígeno tiene un papel más importante.

Las reacciones a) son oxidaciones simples, con una alta velocidad de reacción (prácticamente instantánea) Las otras expuestas en b) y c) son bastante complejas y lentas, necesitándose concentraciones elevadas para que aparezcan de una manera detectable.

El ozono se desintegra rápidamente en el agua de forma que los residuales solo permanecen por corto tiempo. La velocidad con que esto ocurre se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\log [C_0 / C] = a (t - t_0)$$

**Ecuación 3-36: Coeficiente de destrucción a**

**Fuente: Jorge Arboleda Valencia (1992)**

En donde,

$C_0$  = Concentración de ozono aplicado.

$C$  = concentración después del tiempo  $t$

$t$  = Tiempo

$t_0$  = Tiempo inicial

$a$  = Coeficiente de destrucción, el cual varía entre 0.1 y 0.3

Según Harris<sup>59</sup> las dosis de ozono necesarias para desinfectar el agua cambian según la calidad de estas así:

1. Aguas subterráneas de buena calidad con baja turbiedad y contenido mineral: 0.25 a 0.5 mg/l.
2. Aguas superficiales de buena calidad bacteriológica y el ozono aplicado después de la filtración: 2 a 4 mg/l.
3. Aguas superficiales contaminadas y con el ozono aplicado después de la filtración: 2.5 a 5 mg/l.

En resumen, puede concluirse que el ozono en el tratamiento de aguas tiene las siguientes ventajas:

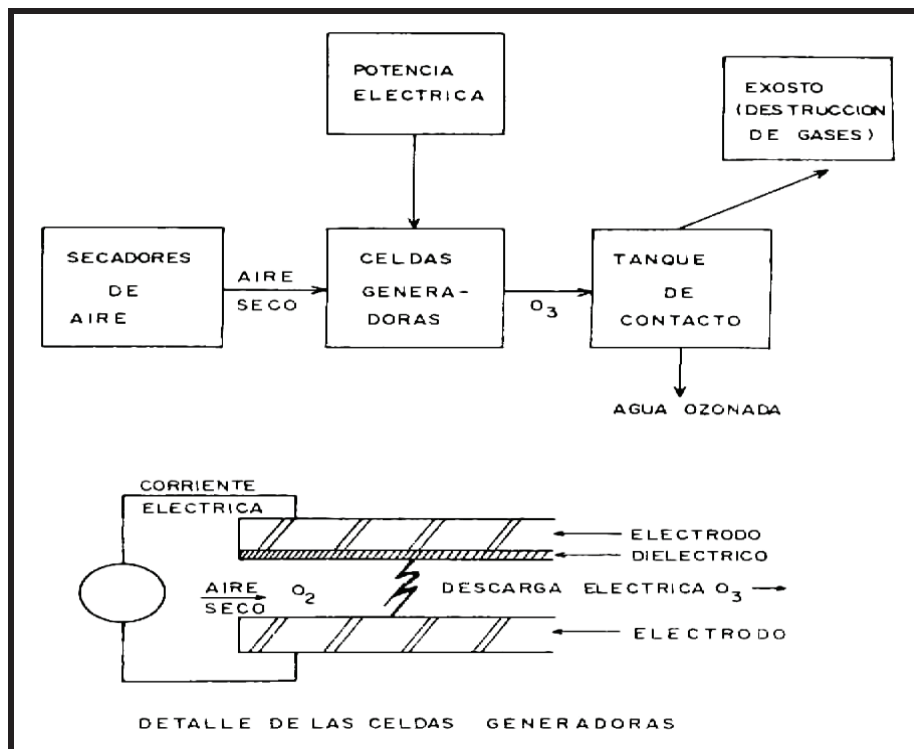
1. La ozonización elimina el olor causado por el hierro, causado por el manganeso o la materia carbonosa, y los sabores y olores debido a la presencia de materia orgánica.
2. El ozono reduce la turbiedad, el sólidos en suspensión y las demandas químicas y biológicas de oxígeno. Además, puede eliminar detergentes y otra sustancia tensa activas no biodegradables. El grado de eliminación dependerá de la cantidad de ozono usada.

---

<sup>59</sup> Harris, C.W., (Mar. 1972). "Ozone disinfection". J. AWWA, 64:182,



3. Es ozono es u poderosa desinfectante. No solo mata bacterias patógenas, sino que, además inactiva los virus y otros microorganismos que no son sensibles a la desinfección ordinaria como cloro.
4. El ozono es un desinfectante más efectivo que el cloro, y su efectividad se presenta en un rango mayor de pH y temperatura.
5. La ozonización es más barata que la súper cloración seguida de una decloración, y del mismo costo que la cloración ordinaria.
6. Como tratamiento terciario de efluentes secundarios, la ozonización es considerablemente más barata que la absorción con carbón activado
7. Si no hay posterior recontaminación, el ozono residual es suficiente para efectuar una desinfección común.
8. El ozono puede ser detectado por el hombre mucho antes de que llegue al nivel toxico
9. El ozono no produce en el agua aumento en el contenido de sales inorgánicas ni subproductos nocivos.



**Figura 3- 28: Diagrama esquemático de un generador de ozono**

**Fuente: Jorge Arboleda Valencia (1992)**

El ozono ha sido utilizado como desinfectante aproximadamente desde el año 1900, principalmente en Europa y Canadá, la información sobre el proceso proviene en su mayoría de las experiencias fuera de la región<sup>60</sup>. No debe olvidarse, que los generadores de ozono son equipos altamente sofisticados, inadecuados para países en desarrollo que demanda un gran consumo de energía eléctrica cuyo suministro requiere ser confiable las 24 horas del día. (Véase figura 3-28).

Es necesario generar ozono en el mismo sitio donde se va a usar debido a que es muy reactivo, no puede ser envasado y transportado como es el caso del cloro. Su vida media en el agua es de aproximadamente 20 minutos. En plantas grandes donde es económico y factible generar ozono utilizando aire secado previamente por refrigeración, se conoce el empleo del ozono para eliminación del manganeso, el agua adquiere una tonalidad rosácea que hace necesaria su filtración por antracita. La ozonización no causa la formación de trihalometanos durante la desinfección, pero el ozono no es efectivo en la remoción de los precursores de THMs.

Efectos de ozono:

- Oxidación de la materia orgánica.
- Reducción de torres de aireación para hierro y manganeso.
- Desintegración de fenoles.
- En la destrucción de organismos patógenos no forma trihalometanos.
- Remoción de ciertas sustancias orgánicas no biodegradables.
- No le afecta la presencia de amonio.
- Es menos dañino para el medio ambiente que el cloro.
- Una de las características de ozono es su acción extremadamente rápida.

En el Ecuador se encuentran gran variedad de equipos ozonizadores en los cuales por la experiencia obtenida se puede afirmar que para un valor de voltaje entre 4,5 a 6 Kv (Kilovoltios) el dieléctrico ideal es el vidrio, mientras que

---

<sup>60</sup>Cliff J. Kirchmer, , (1977) Desinfección, CEPIS, Lima

para valores mayores a este parámetro es necesario que el dieléctrico sea de cuarzo, por sus características de aislante mineral ya que el vidrio es perforado fácilmente por el arco de alto voltaje.

Esquemáticamente un generador de ozono puede ser representado como sigue:

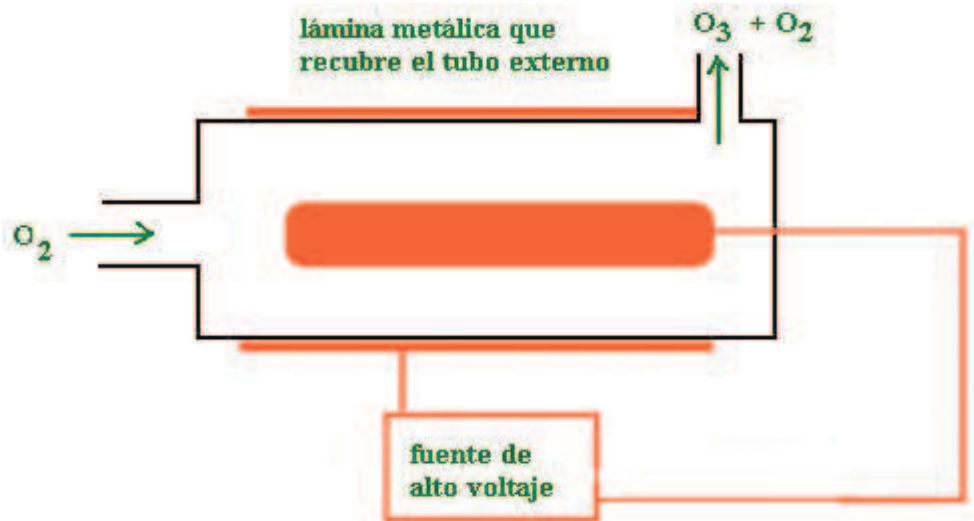


Figura 3-29: Esquema de un generador de ozono

Fuente: Jorge Arboleda Valencia (1992)

El ozono se produce haciendo pasar aire seco u oxígeno, a través de descargas eléctricas de alto voltaje entre los electrodos de un generador. Entre dichos electrodos hay un material aislante que transporta la electricidad por inducción tal como vidrio ó cuarzo. Los voltajes requeridos son de 110 voltios para generadores pequeños y 220/440 para generadores grandes, con una corriente alterna de alta frecuencia. Este voltaje es elevado a 25,000 voltios con frecuencias de 1,000 Hz. Se produce de esta manera una mezcla de aire y ozono, que en forma comercial tiene aproximadamente del 1 al 2% en peso del oxígeno (frecuentemente 1,7%) que se transforma en ozono. La concentración puede ser verificada por un espectrofotómetro. La energía necesaria teóricamente es de apenas un 0.83 vatios/hora/gramo, pero en la práctica se encuentra entre los 14 a 18 vatios.

## 5. Tipos de Ozonizadores.

Los generadores de ozono fueron inicialmente concebidos por Siemens y Otto.

Existen tres tipos básicos de equipos:

- Ozonizador de placas tipo Otto.
- Ozonizador de tubos.
- Ozonizador de placas de tipo Lowtchar.

Los primeros se aplican al agua y el tercero al aire. Comercialmente existen otros tipos Van der Made, Welsbach, Degremont, Paterson, etc.

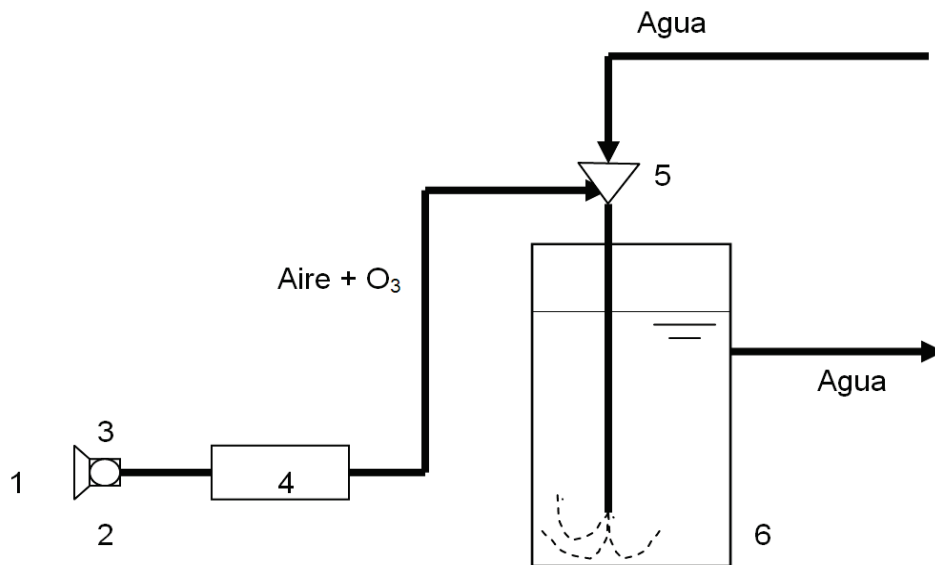
El ozono es muy reactivo por ello los nuevos generadores son fabricados con materiales resistentes a la corrosión. Con la utilización del acero inoxidable se brinda una vida útil a los equipos de 25 años o más. Requieren pocos cuidados de mantenimiento y exige una limpieza anual.

La evolución tecnológica considerablemente aumenta la eficiencia de generadores, los factores que mejoran el rendimiento son:

- a. Reducción de suspensiones en el aire.
- b. El secado del aire por enfriamiento debe ser pasado por secadores como clorato de calcio o gel de sílice. En teoría la unidad de aire debe ser inferior a un  $1 \text{ Kg/m}^3$  y preferiblemente estar debajo de  $0.1 \text{ Kg/m}^3$ .
- c. El enfriamiento del aire a  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- d. El empleo de tensiones más altas 10 o 20 Kv.
- e. Aumentando la frecuencia a máximo 1000 Hz.

Una instalación completa de ozonización comprende las siguientes partes:

1. Filtro de aire.
2. Compresor – enfriador de aire.
3. Secador de aire.
4. Generador de ozono.
5. Dispositivo de mixtura.
6. Cámara de contacto.



**Figura 3-30: Instalación de ozonización**

**Fuente: Jorge Arboleda Valencia (1992)**

El más eficiente bactericida y viricida pero requiere equipos muy caros, difíciles de operar y de alto consumo de energía<sup>61</sup>.

De acuerdo con Miller (1978), citado por Singley (1987)<sup>62</sup> las condiciones para que se pueda utilizar ozono en agua son:

- La temperatura debe ser baja para evitar crecimientos bacterianos posteriores en la red.
- El agua no debe contener hierro para prevenir crecimiento de las bacterias del hierro.
- El agua no debe tener amoníaco para eliminar las microbacterias.
- El carbón orgánico total debe estar por debajo de 1.0 mg/l a fin de minimizar su uso como alimento por microprocesadores.
- El tiempo de residencia medio en la red de distribución debe ser menos de doce horas para minimizar el crecimiento de bacterias.

A las anteriores condiciones debiera agregarse:

- Que haya un suministro de energía confiable durante 24 horas del día, que nunca o casi nunca se interrumpa y si lo hace sea por muy corto tiempo.

<sup>61</sup> Gomella, C., (Ene. 1972) "Ozone practices in France". *J. AWWA*, 64:39,

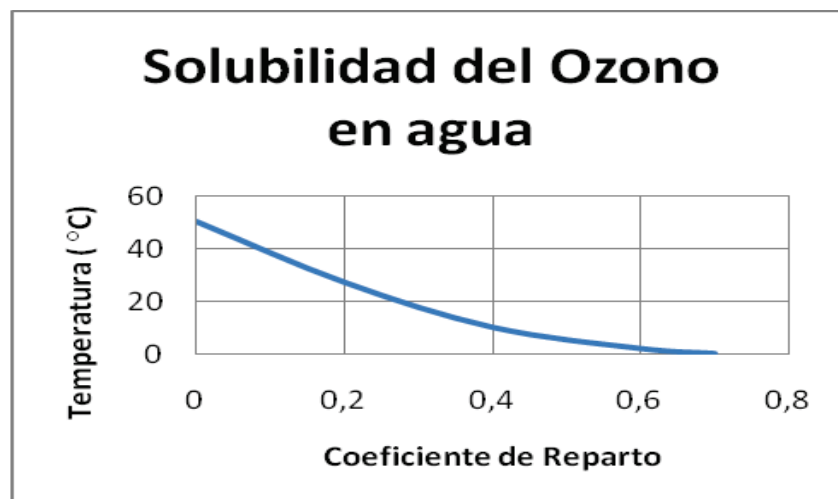
<sup>62</sup> Singley E., (1988). "Taller Internacional sobre actualización en desinfección del agua". *ACODAL* Seccional Valle del Cauca. Memoria.

- Que exista en la planta, personal técnico altamente calificado para manejar los equipos.
- Que se agregue cloro al final del proceso con el fin de mantener en la red desinfectante residual.

El ozono, por eso sirve preferencialmente como método de oxidar la materia orgánica presente en el agua cruda. En los países Europeos, sin embargo, se suele aplicar como sistema de desinfección terminal lo que a veces, da origen a recrecimientos bacterianos en la red, como se explicó antes, además de que no deja residual.

### **6. Incorporación del Ozono al Agua**

Como vehículo portante se emplea aire con una concentración determinada de ozono que se hace borbotear bien por medio de un difusor, bien por eyector “Venturi” bajo presión. Normalmente las relaciones de concentración son de 10gr O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> de agua; es decir 100 lts de aire ozonizado por cada m<sup>3</sup> de agua. La transferencia de ozono al agua, se rige por la ley de Henry, es decir, que las cantidades disueltas son función de la presión y la temperatura<sup>63</sup>. Es como utilizar el coeficiente de reparto, como se puede observar en la figura siguiente:



**Figura 3-31: Coeficiente de reparto**

**Fuente: Roberto A. García, (10 de Septiembre de 2004)**

<sup>63</sup> Roberto A. García, (10 de Septiembre de 2004). El ozono en el tratamiento del agua, Guía Técnica Triozon, Zaragoza, España,

## **7. Influencia del pH y de la Temperatura**

A temperaturas bajas el ozono actúa mejor, ya que se disuelve mejor en el agua y permanece más tiempo, sin embargo a temperaturas elevadas el ozono ataca mejor a las bacterias porque tienen menos tendencia a esporular y rompen la espora; por ello se dan resultados contradictorios<sup>64</sup>.

## **8. Acción Sobre El Plancton**

La aplicación del ozono en concentración de 0.5 a un gr O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> de agua destruye también las algas y protozoos, así como un 98% de larvas de moluscos, con concentraciones de 1 a 1.5 gr de O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> de agua. La ozonización destruye igualmente productos que resulten del metabolismo de los componentes del plancton y que producirían olores y sabores desagradables<sup>65</sup>.

## **9. Puesta en Contacto**

Se utilizan diferentes métodos de puesta en contacto del ozono con el agua a tratar, entre los cuales pueden citarse<sup>66</sup>:

En Contacto Por Inyector: Cuando la carga disponible es inferior a 2 metros, se divide el caudal a tratar en dos fracciones distintas. La parte menor se bombea con el fin de incrementar su presión y asegurar el funcionamiento del inyector del aire ozonizado. El resto del caudal se introduce, por gravedad, en la base de la columna de contacto. Este método no es muy eficaz, debido a la mala homogeneización del contenido de ozono al mezclarse con la fracción de agua que no ha pasado por el inyector.

Contacto Por Difusores Porosos: En una base de torre de contacto, se disponen unos difusores porosos con los que se obtiene una división del aire

---

<sup>64</sup> Harris, .C.W., (Feb. 1972). "Ozone disinfection". J.AWWA, 64:182,

<sup>65</sup> Somerville, R.C. & Rempel, G., (Jun. 1972). "Ozone for supplementary water treatment". J. AWWA, 64:377,

<sup>66</sup> Hann, V.A., (Feb. 1942). "Desinfection of drinking water with ozone". J. AWWA, 34:275,

ozonizado en burbujas muy finas. El agua a tratar se introduce en la torre por su parte superior, obteniéndose así un contacto de varios compartimientos, con inyecciones parciales de aire ozonizado efectuadas, preferentemente, a corriente. Los difusores porosos son de tipo tubular o de disco.

**Contacto Por Turbina:** El agua a tratar se introduce en la zona de aspiración de una turbina que le impulsa hacia abajo al encuentro de un flujo de aire ozonizado inyectado por debajo de la misma. Una emulsión muy fina (aire ozonizado- agua) se difunde en la totalidad de la parte anterior a la torre de contacto, y es recogida por la turbina, cuyo caudal de circulación representa varias veces el caudal del agua a tratar. Una turbina de perfil especial provoca el cizallamiento de las burbujas de aire ozonizado, garantizando así una buena difusión de la mezcla gaseosa en la masa

## **3.6 SITUACIONES DE EMERGENCIA**

### **3.6.1 INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES.**

Los servicios de agua potable cumplen una función muy importante en el proceso de desarrollo de los países, tanto en situaciones normales como en aquellas en que la vida y las instituciones se ven afectadas por desastres, teniendo la desinfección del agua un papel trascendental en tales circunstancias. Las agencias Federales de los EE.UU. y la Cruz Roja recomiendan estos cuatro pasos para desinfectar el agua potable en una emergencia:

1. Si está disponible, utilice agua embotellada que no ha sido expuesta a las inundaciones.
2. Si no tiene agua embotellada, debe hervirla para que sea segura. Hervir el agua eliminara la mayoría de los tipos de organismos presentes que causan enfermedades. Si el agua esta oscura, fíltrela por medio de paños limpios o permítale que se deposite y remuévale el agua clara para hervirla.



3. Si no puede hervir el agua, puede desinfectarla usando el blanqueador que se utiliza en el hogar. El blanqueador eliminara algunos, pero no todos los tipos de organismos que causan enfermedades que puedan estar presentes en el agua. Si el agua esta oscura, fíltrela por medio de paños limpios o permítale que se deposite y remuévale el agua clara para desinfectarla. Agregue un 1/8 de cucharada (u 8 gotas) de blanqueador regular, no perfumado que se usa en el hogar por cada galón de agua, agítelo bien y déjelo reposar por 30 minutos antes de utilizarlo. Guarde el agua desinfectada en contenedores limpios con cubiertas.
4. Si tiene un pozo que se ha inundado, el agua debe ser probada y desinfectada después que la inundación se desvanezca. Si sospecha que su pozo pueda estar contaminado, comuníquese con su departamento de salud local o estatal, o el agente de la extensión de agricultura para consejos específicos.

Cuando se corta el suministro de agua en su casa debido a razones naturales u otros tipos de desastres, usted podrá conseguir alguna cantidad limitada de agua vaciando el tanque de agua caliente o derritiendo cubitos de hielo. Si el agua de pozo profundo no está disponible y tiene que usar agua de un río o lago, evite lugares que contengan materiales flotantes y agua de color oscuro u olor. Generalmente, el agua de la corriente es de mejor calidad que el agua estancada<sup>67</sup>

#### **3.6.1.1 La condición física del agua.**

Cuando sea necesaria la desinfección de emergencia, los desinfectantes son menos eficaces en el agua turbia, oscura o con color. Filtre el agua turbia o con color con paños limpios o déjela reposar para que los sedimentos se depositen. Es mejor hacer los dos, dejarla depositar y filtrarla. Después de filtrarla hasta que este clara o hasta que toda la tierra y otras partículas se depositen, extraiga el agua limpia y clara para desinfectarla. El agua que se prepara para la desinfección debe almacenarse solamente en envases limpios, muy bien cerrados y no sujetos a la corrosión.

---

<sup>67</sup> UNDRO, (1982). Prevención y mitigación de desastres,

### 3.6.1.2 Selección del método para desinfectar

El hervir y el tratamiento químico son dos métodos generales utilizados para desinfectar pequeñas cantidades de agua filtrada y depositada.

Hierva abundantemente por un minuto el agua filtrada y depositada (en altitudes de una milla, hiérvala por tres minutos). El hervir es el mejor método para hacer el agua segura para beberla y eliminar los micro-organismos que causan enfermedades como Giardia lamblia y Cryptosporidium, las cuales son frecuentemente encontradas en ríos y lagos.

Cuando hervirla no es práctico, algunas químicas eliminarán la mayoría de los organismos dañinos o que causan enfermedades. Para que la desinfección química sea efectiva, primero, el agua debe ser filtrada y depositada. El cloro y yodo son las dos químicas comúnmente usadas para tratar el agua. Generalmente el cloro es más efectivo que el yodo controlando la Giardia y los dos desinfectantes trabajan mucho mejor en agua tibia.

<b>Cloro Disponible</b>	<b>Gotas por Cuarto/Galón de Agua Clara</b>	<b>Gotas por Litro de Agua Clara</b>
1%	10 por Cuarto – 40 por Galón	10 por Litro
4-6%	2 por Cuarto – 8 por Galón (1/8 de cucharada)	2 por Litro
7-10%	1 por Cuarto – 4 por Galón	1 por Litro

**Tabla 3-16: Dosis de cloro para desinfección de agua**

**Fuente: UNDRO, (1982)**

Puede usar un blanqueador de cloro, no perfumado que se usa en el hogar que contiene hipoclorito de sodio para desinfectar el agua. No use un blanqueador sin cloro para desinfectar el agua. Siga las instrucciones escritas en la etiquetas. Cuando las instrucciones necesarias no son provistas, busque el porcentaje disponible de cloro en la etiqueta y utilice la información de la tabla

3-17 como guía. (Recuerde, 1/8 de cucharada y 8 gotas son aproximadamente la misma cantidad.)<sup>68</sup>

Si no se conoce la concentración del contenido de cloro, añada diez gotas por cuarto o litro de agua filtrada y depositada. Doble la cantidad de cloro para agua turbia, oscura o con color o agua extremadamente fría. Mezcle bien el agua tratada y déjela reposar durante 30 minutos. El agua deberá tener un ligero olor a cloro. Puede usar Hipoclorito de Calcio Granular para desinfectar el agua. Añada y disuelva una cucharadita llena de hipoclorito de calcio granular de buena calidad (aproximadamente 7 gr ó 1/4 de onza) por cada 2 galones de agua o 5 mililitros (aproximadamente 7 gramos por cada 7.5 litros de agua).

El yodo común que se utiliza en el hogar por motivos medicinales se puede también utilizar para desinfectar el agua. Añada cinco gotas al 2 por ciento de tintura de yodo de Farmacopea U.S. o aprobado por su país, por cada cuarto o litro de agua limpia. Para el agua turbia añada diez gotas y deje la solución reposar durante 30 minutos por lo menos. Puede usar Tabletas de Yodo para desinfectar el agua filtrada y depositada. Compre las tabletas de yodo preparadas para la venta que contienen la dosis

### 3.6.1.3 Resumen e ilustración de los puntos dominantes

Filtre el agua turbia o con color con paños limpios o déjela reposar para que los sedimentos se depositen. Es mejor hacer los dos, dejarla depositar y filtrarla.

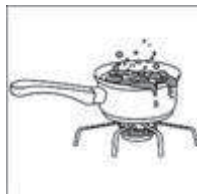


**Figura 3- 32: Filtración de agua turbia**

**Fuente: UNDRO, (1982).**

<sup>68</sup> Muñoz M. – Balarezo A., (1992). Métodos alternos de desinfección de agua para bebida y preparación de alimentos en el área rural, Ed. EPN-FIC, Quito,

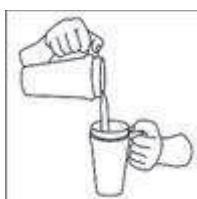
El hervir es el mejor método para hacer el agua segura para beberla y eliminar los micro-organismos que causan enfermedades como Giardia lamblia y Cryptosporidium, las cuales son frecuentemente encontradas en ríos y lagos.



**Figura 3-33: Hervir el agua**

**Fuente: UNDRO, (1982).**

Para mejorar el sabor blando del agua hervida, aeree el agua por medio de cambiarla de un envase a otro y déjela reposar por unas horas o agréguele una pizca de sal por cada cuarto o litro de agua hervida.



**Figura 3-34: Aireación del agua**

**Fuente: UNDRO, (1982).**

Cuando hervirla no es práctico, algunas químicas eliminaran la mayoría de los organismos dañinos o que causan enfermedades. El cloro y yodo son las dos químicas comúnmente usadas para tratar el agua.



**Figura 3-35: Uso de Cloro y Yodo**

**Fuente: UNDRO, (1982).**

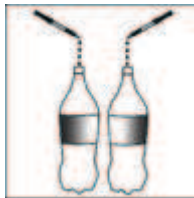
Puede usar un blanqueador de cloro, no perfumado que se usa en el hogar que contiene un compuesto de cloro para desinfectar el agua. (Recuerde, 1/8 de cucharada y 8 gotas son aproximadamente la misma cantidad.)



**Figura 3-36: Uso de hipoclorito de sodio**

**Fuente: UNDRO, (1982).**

Puede usar Tintura de Yodo para desinfectar el agua filtrada y depositada. El yodo común que se utiliza en el hogar por motivos medicinales se puede también utilizar para desinfectar el agua



**Figura 3- 45: Uso de tintura de yodo**

**Fuente: UNDRO, (1982).**

Tintura de Yodo. Para el agua turbia añada diez gotas y deje la solución reposar durante 30 minutos por lo menos.



**Figura 3- 46: Filtración de agua turbia**

**Fuente: UNDRO, (1982).**

### **3.6.2 CLORACIÓN DURANTE UN DESASTRE**

Aunque la cloración del agua es un proceso complicado que no puede incorporarse permanentemente en pequeños abastecimientos de agua en muchas zonas rurales remotas, la cloración es mucho más sencilla y mucho

más importante durante un desastre. El punto de partida será una de las sustancias enumeradas en la tabla 3-21 y, tal vez más frecuente, será el polvo blanqueador o el hipoclorito de calcio.

<b>Tipo de sustancia química</b>	<b>Denominaciones registradas o marcas de fábrica</b>	<b>Cantidad que debe emplearse</b>	<b>Modo de empleo</b>
Desinfectante (solución de Hipoclorito)	Ajax, Fast, Cloro 100, Strong, Zonite, Agua de javel	Aproximadamente 1 litro	Úsese directamente con el agua que va a tratarse
Blanqueadores comerciales	Blanky tex, Clorox, Dazzle, Regina	0,12 a 0,38 litros	Uso directo
Polvo blanqueador	Llamado también cloruro de cal (Hipoclorito de Calcio)	30 a 40 gramos si se extrae de una lata previamente no abierta	Mézclase con un litro de agua para hacer una solución de 10 g/l o sea una solución al 1%
Blanqueador estabilizado	Stablochlor, Maxicloro, Clorotol	40 gramos	Mézclase como se hace con el polvo blanqueador
Hipoclorito de sodio de alta calidad		15 a 20 gramos si es nuevo	Mézclase como se hace con el polvo blanqueador
Hipoclorito de sodio	Hipoclorito de sodio	No es adecuado para transporte en largas distancias ni en climas cálidos; sólo para usos especializados.	Úsese directamente con el agua que va a tratarse
Tabletas para esterilizar agua	Halasone, Sterotabs, Htdro, Chlorazone, Halamid, Chloraine-T, Chlor-dechor, Tablet feeder, Aquaward.	No son adecuadas para tratar grandes volúmenes de agua; Es necesario el uso de dosificadores donde hay que seguir las instrucciones de los fabricantes.	Colocación en tubos del equipo dispensador de desinfección y uso directo en dosificador.

**Tabla 3-17: Sustancias usadas para la cloración**

**Fuente: UNDRO, (1982).**

Sustancias químicas que pueden usarse para la cloración del agua y cantidad de cada una que se necesita para desinfectar 1000 litros con una dosis de 10 mg/l; para una dosis de 5 mg/l, debe usarse la mitad de las cantidades.

Estas sustancias vienen en latas o envases herméticos y se descomponen al exponerlas al aire. Al preparar la solución, se coloca la cantidad necesaria de polvo en un lavamanos o recipiente adecuado y se agrega lentamente el agua mientras se agita el polvo hasta disolverlo.

Los pasos finales para preparar la solución son: añadir más agua y diluir hasta el volumen indicado; dejando que se asiente el sedimento, decantar y usar el líquido clarificado.

El proceso y el equipo que pueden usarse para descontaminar con cloro e impedir diversos riesgos para la salud comprende:

- a) Cuando está almacenada el agua en tanques grandes, la solución de cloro se agrega manualmente al llenar el tanque, usando la entrada de agua para agitar y distribuir la solución.
- b) Cuando el agua se suministra continuamente mediante un tubo, pueden improvisarse los cloradores con solución de cloro que gotea en proporción uniforme y regulada, mezclándola con el agua corriente. Burns y Howar<sup>69</sup> ponen como ejemplo un dispositivo de esta clase diseñado especialmente para clorar agua extraída de un pozo mediante una bomba de succión, eléctrica o de diesel.
- c) Un método más sencillo de cloración para un abastecimiento continuo es el uso de cloradores en recipientes que se recomiendan para desinfectar pozos Cairncross y Feachem y Assar<sup>70</sup>.
- d) Se han ideado unidades móviles montadas en remolques, principalmente para usarse en campamentos del ejército, que constan de una bomba, un filtro y un clorador en una pieza de equipo compacta pero bastante compleja. Estas unidades pueden bombear agua de un río contaminado o de cualquier otra fuente accesible y convertirla en un abastecimiento portátil de agua. Una unidad ordinaria de este tipo tiene una producción de 6000 litros por hora.
- e) A veces se convendrá suministrar agua clorada a las personas en sus propios recipientes. Estos deben estar perfectamente limpios, pero si no son totalmente estériles. El agua clorada les ayudará a conseguirlo, a condición de que se deje reposar el agua en el recipiente antes de usarla.

---

<sup>69</sup> Burns R.H. y Howard J., (1974). *Safe Drinking Water*, Oxfam, Oxford,

<sup>70</sup> Cairncross A. y Feachem G., (1977). Small Drinking Water Supplies, Ros Institute Bulletin N° 10, Londres,

## CAPITULO 4: ESTUDIO COMPARATIVO

### 4.1 COMPARACIÓN DE LA ACTIVIDAD GERMICIDA DE LOS DESINFECTANTES QUÍMICOS.

Según sea el tipo de microorganismos que se quiera eliminar, cada desinfectante químico tiene una efectividad distinta basándose en la cual deberán estimarse los tiempos de contacto necesarios.

La tabla 4-1 presenta una comparación de la efectividad de diferentes compuestos de cloro y de otros desinfectantes para matar o inactivar el 99% de organismos tales como bacterias entéricas, quistes de amibas, virus y esporas bacterianas. La actividad germicida de los desinfectantes químicos y su concentración en mg/l requerida para matar o inactivar 99% de los organismos, listados en 10 min a 5 °C (según Moore).<sup>71</sup>

Desinfectante	Tipo de organismo			
	Bacterias entéricas	Quistes de amibas	Virus	Esporas bacterias
I <sub>2</sub>	----	3,7	6,3	---
O <sub>3</sub>	0,01	1	0,1	0,2
ClO <sub>2</sub> (pH 6-7)	0,4 - 0,75	---	0,2 - 6,7	---
HOCl como Cl <sub>2</sub>	0,02	10	0,4	10
OCl como Cl <sub>2</sub>	2	10	>20	>10
NH <sub>2</sub> Cl como Cl <sub>2</sub>	5	20	100	400
Cl libre, pH 7,5	0,04	20	0,8	20
Cl libre, pH 8	0,1	50	2	50

**Tabla 4-1: Actividad germicida de los desinfectantes químicos.**

**Fuente: UNDR0, (1982).**

En la tabla se puede apreciar que el HOCl es 100 veces más eficiente que el OCl<sup>-</sup> para matar bacterias entéricas y 500 veces más que la monocloramina,

<sup>71</sup> Moore, A.W.; Megregian, S.& Ruchhoft, C.C., (Oct. 1943). "Some chemical aspects of ammoniachlorine treatment of water". J. AWWA, 35:1329,



pero 20 veces menos que el ozono. La monocloramina resulta el desinfectante más eficiente que el  $\text{OCl}^-$  para matar quistes de amibas. Recuérdese que la capacidad bactericida del cloro disminuye drásticamente al aumentar el pH. El ozono es el desinfectante más eficiente de todos los compuestos químicos estudiados.

#### **4.1.1 RECRECIMIENTO DE BACTERIAS EN LAS TUBERÍAS.**

Debe tenerse muy en cuenta que la desinfección del agua no implica su esterilización. La desinfección y la esterilización son dos procesos diferentes. La desinfección consiste en la reducción parcial de los microorganismos presentes en el agua hasta alcanzar un nivel que no represente peligro para la salud; mientras que la esterilización consiste en la destrucción total de dichos microorganismos. Este último proceso no suele practicarse en las plantas de agua potable.

Aún en el caso de que se logren remociones bacteriales del orden de 99.99% algunos organismos quedan, que, de encontrar un medio favorable, vuelven a desarrollarse, incluso en presencia de cloro residual. Se han encontrado, por eso, coliformes a la salida de los tanques de almacenamiento en las tuberías matrices donde el cloro residual libre alcanza valores de 1 a 2 mg/l.

#### **4.1.2 OZONO.**

Se estableció comparación entre ozono ( $\text{O}_3$ ) versus cloro (Cl), dado que es el Cl, el elemento más usado como agente de la desinfección del agua potable en todo el mundo. En general, ambos elementos realizan la misma misión, tratamiento del agua por oxidación química. Desde hace mucho tiempo se viene intentando la destrucción de gérmenes patógenos por oxidación basándose en reacción química, normalmente constituye la etapa final de otros tratamientos. Almacenaje, filtración, floculación, decantación, etc. En esta última etapa de tratamiento por oxidación, se han venido utilizando como reactivos el cloro y sus derivados, el bromo, yodo, ozono, permanganato potásico e incluso el agua oxigenada.

Las razones para que se haya divulgado y generalizado el uso del cloro frente al del ozono han sido: precio, era más barata en principio una instalación de cloro que de ozono; Y primordialmente, debido a la fuerte inestabilidad del ozono, los métodos de generación que eran complicados y muy onerosos.

#### 4.1.2.1 Ozono Versus Compuestos Clorados

Si las aguas a tratar tienen nitrógeno orgánico o amoníaco libre, se forman cloraminas que producen olores y sabores medicamentosos desagradables, el mayor inconveniente es la formación de compuestos clorados tales como PCB's (bifenilos policlorados) que tienen un probado carácter carcinógeno<sup>72</sup>.

Los trihalometanos (THMs) son compuestos orgánicos potencialmente cancerígenos y que aparecen en el agua potable tras ser sometido a cloración, conforme a las circunstancias explicadas en el capítulo 3.4.1.2 literal 4.

Diversos países están controlando los máximos admisibles:

- Alemania máximo 25 mg/l.
- EE.UU. máximo 100 mg/l.

En 1944, Smith y Bodkin compararon la acción bactericida del cloro y del ozono a diferentes valores del pH, la concentración del cloro necesaria para esterilizar la misma agua es de 20 a 40 veces superior. Se puede decir, pues, que el ozono actúa, en la desinfección de 600 a 3000 veces más rápido que el cloro.

pH	t (min)	V (lit.)	Bacterias/100ml	O <sub>3</sub> (mg/l)	Cl <sub>2</sub> (mg/l)
5	5	1	8x10 <sup>7</sup>	0.13	2.7
8	7.5	1	8x10 <sup>7</sup>	0.20	7.9

Tabla 4-2: Acción bactericida O<sub>3</sub> vs. Cl<sub>2</sub>

Fuente: Smith y Bodkin, (1944)

<sup>72</sup> Roberto A. García, (10 de Septiembre de 1994). El ozono en el tratamiento del agua, Guía Técnica Triozon, Zaragoza, España,

Concentración 1 mg/l	t (min)	Coliformes totales (inicio)	Coliformes totales (final)
O <sub>3</sub>	1	190 (ml)	1 (ml)
Cl <sub>2</sub>	40	40 (ml)	2 (ml)

**Tabla 4-3: Comparación O<sub>3</sub> vs. Cl<sub>2</sub>**

**Fuente: Roberto A. García, (10 de Septiembre de 1994)**

En la tabla siguiente se indican las concentraciones de desinfectante, en mg/l, necesarias para matar o inactivar el 99.9% de los organismos tabulados en diez minutos y a 5 grados de temperatura.

DESINFECTANTE	BACTERIAS ENTÉRICAS	CISTIDOS AMÉBICOS	VIRUS	ESPORAS BACTERIANAS
Ozono (O <sub>3</sub> )	0.001	1.0	0.1	0.2
Cl <sub>2</sub> como ClOH	0.02	10.0	0.4	10.0
Cl <sub>2</sub> como ClO	2.0	1000	20.0	1000
Cl <sub>2</sub> como ClNH <sub>2</sub>	5.0	20.0	100	400
Cl <sub>2</sub> (pH 7.5)	0.04	20.0	0.08	20.0
Cl <sub>2</sub> (pH 8)	0.1	50.0	2.0	50.0

**Tabla 4-4: Concentraciones de Desinfectante**

**Fuente: Roberto A. García, (10 de Septiembre de 1994)**

En definitiva podemos afirmar que el ozono realiza las siguientes funciones en el agua:

1. Degradación de sustancias orgánicas
2. Desinfección
3. Inactivación de los virus
4. Mejora substancial de sabores y olores
5. Eliminación de colores extraños
6. Eliminación de sales de hierro y manganeso
7. Floculación de materias en suspensión
8. Eliminación de sustancias tóxicas
9. Desestabilización de materias coloidales

### **4.1.3 OZONO Y CLORO**

Por casi todo grifo de agua sale cloro, así que no es nada extraño que existan restos del mismo en la cisterna o piscina. Pero, utilizando un generador de ozono se puede reducir la concentración de cloro que traen las tuberías, en más de un 90%. Y en vista de que el ozono reduce o elimina la formación de derivados de cloro, que producen irritación y un olor característico, por lo que el  $\text{Cl}_2$  será escasamente percibido; este, simplemente tendrá una acción residual y ayudará a prevenir el crecimiento de algas.

### **4.1.4 OZONO Y GENERADORES DE CLORO**

Los generadores de cloro automáticamente crean cloro activo de la sal común. Usar un generador de cloro con ozono es más conveniente y seguro, pero es un método de purificación algo caro. Instalar el generador de cloro a continuación del generador de Ozono. Entonces mantener una concentración de 1.5 a 2 p.p.m. durante dos semanas. Después de estas dos semanas, baje el nivel de cloro a 0.4 ppm. Mantener este nivel continuamente, controlando una vez cada semana y ajustando cuando sea necesario. Súperoxidar sólo si la calidad del agua empobrece.

### **4.1.5 OZONO Y DISPENSADORES DE CLORO**

Usar un dispensador de cloro junto con un generador de ozono, es una forma de purificación automática y barata. Existen varios tipos de dispensadores de cloro, todos son muy efectivos con Ozono. Es necesario manipular cloro. Si se está usando un dispensador flotante, debe llenarse con tabletas y ponerlo en la superficie del agua a tratar, en caso de usar dispersores de corriente de agua interna o externo, instale el dispersor a continuación del generador de Ozono.

### **4.1.6 OZONO Y CLORO LÍQUIDO ALIMENTADO A MANO**

Este es probablemente el método más barato para mantener su piscina con ozono, pero debe tener cuidado que los niveles de cloro no alcancen niveles

muy altos. Después que el generador de ozono se encuentre trabajando normalmente, mantenga una dosis de  $\text{Cl}_2$  de 1.5 a 2 p.p.m. Por dos semanas, después de este tiempo mantenga el nivel en 0.4 p.p.m. Controlando una vez cada semana y ajustando cuando sea necesario.

#### **4.1.7 OZONO Y BROMO**

Así como en el caso del cloro, el ozono reduce o elimina la formación de derivados del bromo que produce irritación y un olor característico. También el bromo, será escasamente percibido; éste, simplemente tendrá una acción residual y ayudará a prevenir el crecimiento de algas.

#### **4.1.8 OZONO Y TABLETAS DE BROMO**

Este es un buen sistema de purificación porque las tabletas no son caras y pueden ser alimentadas automáticamente. Después que el generador de ozono se encuentre operando normalmente, ajustar el dispensador de bromo para mantener un nivel de 2 a 4 p.p.m., tomará unos pocos días para ajustar y agregará bromo hasta alcanzar este nivel. Una vez establecido este nivel, mantener por dos semanas; cumplido este tiempo baje el nivel de bromo a 0.8 p.p.m. Y chequear cada semana, ajustándolo si es necesario. Súper-oxidar solo si la calidad del agua empobrece.

#### **4.1.9 OZONO Y BROMURO DE SODIO**

El bromuro de sodio es una forma inerte del bromo, es activado por un oxidante. El bromo activo es inestable, sin embargo, puede ser monitoreado y ajustado frecuentemente. Una vez instalado el Generador de Ozono y se encuentre operando adecuadamente, agregar cuatro libras de bromuro de sodio por cada diez mil galones. Añadir un oxidante no clorado diariamente por dos semanas, manteniendo un nivel de 2 a 3 p.p.m., de bromo activo; cumplido este tiempo mantener el nivel de bromo activo a 0.8 p.p.m., añadiendo más oxidante no clorado si es necesario. Súper-oxidar solo si la calidad del agua empobrece.

#### **4.1.10 OZONO Y IONIZADOR CATALÍTICO**

Una excelente alternativa de purificación es una combinación de ozono con Ionizador Catalítico. El Ionizador Catalítico libera pequeñas cantidades de plata coloidal dentro del agua, manteniéndolos en forma residual 3 a 5 mg/l. Este es un método de purificación caro pero efectivo y conveniente, porque está completamente libre de químicos. Simplemente ajusta el Ionizador Catalítico y el Ozonizador según instrucciones de fábrica, y mantiene de 1 a 2 p.p.m. de plata residual ó de 2 a 4 p.p.m. de bromo por dos semanas. Después de este periodo de tiempo, disminuye el cloro o bromo por disipación gradual.

El equipo consiste en celdas electrolíticas colocadas dentro de recipientes cerrados a presión, aunque los controles son rápidos y simples debe ser frecuente y existir algún sistema de control automático en caso de falla de la corriente eléctrica. Es difícil controlar la concentración de plata en el agua, solamente con análisis de laboratorio y no hay métodos simples para medir la concentración residual, no hay cambios organolépticos en el agua tratada ni generación de subproductos de la desinfección, siendo desinfectante efectivo y simple su operación, manteniéndose la limpieza de los electrodos.

#### **4.1.11 OZONO Y DIÓXIDO DE CLORO.**

Es tal vez el desinfectante alternativo más popular después del ozono para aguas que contengan grandes concentraciones de precursores que puedan dar origen a trihalometanos. Existen, sin embargo, limitaciones sanitarias que reducen la máxima dosis aplicable a 1 mg/l. Como ocurre con el O<sub>3</sub> el principal empleo del ClO<sub>2</sub> es la oxidación de la materia orgánica presente en el agua cruda por reducción, tanto del carbono orgánico total como de los malos olores y sabores.

Es pues una forma de pretratamiento, siempre y cuando se use la cloración como desinfección terminal. El mayor inconveniente para su empleo es su costo por cuanto suele ser restrictivo. Por otra parte la operación de los equipos requiere precauciones especiales, debido a que el ClO<sub>2</sub> es un gran explosivo.

Otro de los limitantes para su consumo es que el umbral de gusto y olor es de 0.4 mg/l, independiente del pH y presencia del  $\text{NH}_3$ . El dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) elimina sistemáticamente la formación del cloro fenol, pero no tiene efecto sobre otros muchos sabores como el sabor a la tierra o lodo. Solo es, por tanto, recomendable cuando el único sabor que puede producirse, es debido a clorofenoles, situación poco rara en tratamiento de aguas para consumo.

Para evitar la presencia en el agua de un contenido excesivo de clorito sódico, es preciso, por una parte, limitar la dosis de dióxido que se emplea y, por otra, el carácter reversible de la reacción, utilizar una cantidad de cloro, para su formación, superior a la necesaria. El dióxido de cloro es un excelente desinfectante que mejora la remoción del hierro y manganeso, no se ve afectado por las variaciones del pH del agua y en ocasiones mejora la calidad organoléptica del agua tratada.

#### **4.1.12 OZONO Y ULTRAVIOLETA.**

La desinfección por ozono y radiación ultravioleta necesitan de electricidad. La radiación ultravioleta no genera subproductos en la desinfección, al no requerir del uso de ninguna sustancia química no hay cambios organolépticos. Para asegurar la dosis adecuada debe contarse con varios equipos de control que monitorean la emisión de la radiación, la vida de las lámparas, etc. No hay forma de medir la eficacia de la desinfección en forma simple y rápida, salvo realizar un análisis bacteriológico, en cuanto al mantenimiento es necesario asegurar la limpieza de los encamisados cuando los tubos están sumergidos.

El equipo básico en si (lámpara UV) es de escasa o nula complejidad, sin embargo los equipos auxiliares que deben acompañar a aquella le confieren un variado rango de complejidad dependiendo del grado de seguridad buscado. En la desinfección por ozono el equipo se adquiere con sus sistemas de control debiendo poner atención a los avisos de alarma de los mismos. Es un sistema complejo que requiere personal capacitado para operación y control. Es un excelente desinfectante que forma subproductos en la desinfección, aunque no tan importantes como los del cloro, mejora la calidad organoléptica del agua

tratada, sin dejar efecto residual. La mayoría de los equipos se venden con sus sistemas de control debiendo prestarle mucha atención a los avisos de alarma de los mismos, el control analítico se realiza por titulación amperométrica de cuatro pasos, lo que significa instrumental específico y requiere personal capacitado para operación y control, forma subproductos en la desinfección, aunque no tan importantes como los del cloro, sin dejar efecto residual. Requiere buena provisión de los insumos químicos y electricidad asegurada.

#### **4.1.13 CLORO GAS Y EL HIPOCLORITO DE CALCIO**

El cloro oxida la materia orgánica produciendo subproductos de la desinfección. El equipo de cloro gas consta de dosificadores montados en cilindros y tanques, trabajando bajo presión ó al vacío, requieren bombas para recircular el agua y otros equipos auxiliares, los tanques se consiguen fácilmente pues su uso es el más popular del mundo, hay residual en el agua que es fácilmente medible, existe una gama de comparadores de cloro residual, sencillos y baratos. Puede producir cambios en el gusto y sabor. Deben existir recintos especialmente adecuados y equipos de protección personal. En comunidades alejadas deben asegurarse la provisión de cloro gas, por lo que requiere de personal con cierto grado de capacitación. El control debe ser frecuente o casi constante, debe haber sistemas de alarma automáticos. El hipoclorito de calcio necesita de hipocloradores y la solución se puede dosificar a presión atmosférica ó con determinada presión para lo cual requiere bombas a diafragma o pistón, son sistemas simples y casi automáticos, las bombas pueden repararse localmente, requiriendo de electricidad, el hipoclorito es de fácil adquisición y los dosificadores pueden producirse localmente, existiendo residual en el agua tratada que es fácilmente medible, los controles aunque rápidos y simples deben ser frecuentes

#### **4.1.14 ELECTROLISIS IN SITU Y EL HIPOCLORITO DE CALCIO**

El insumo principal es la sal que es fácil conseguir y la electrolisis produce hipoclorito de baja concentración que es muy manejable, produciendo residual en el agua tratada que es fácilmente medible, requiere de electricidad, los



equipos y repuestos solo se consiguen en determinados países por lo que se necesita importarlos. Existen dos tipos de sistemas diferenciados por su capacidad de producción: Pequeños y simples para uso familiar y población rural. Los industriales para usar en plantas potabilizadoras que son más grandes y complejos. El hipoclorito de calcio es necesario diluirlo en tanques hipocloradores para luego agregarlo dosificadamente al agua a presión atmosférica.

#### **4.1.15 BROMO, YODO Y EL DICLORO ISOCIANURATO**

Debido a que en determinados usos específicos de la industria o agricultura se necesitan parámetros determinados de calidad del agua adicionalmente a los métodos ya mencionados para plantas de flujo continuo. La aplicación de solución de bromo es igual a la de hipoclorito de sodio donde los dosificadores pueden producirse localmente generando un residual en el agua tratada que es medible, produce subproductos de la desinfección y requiere un mantenimiento y supervisión mayor a la del cloro, es difícil conseguir en países en desarrollo y su costo es mayor. El yodo oxida la materia orgánica, su complejidad es baja, aunque hay un paso adicional de cierto cuidado, que es la preparación de la solución de yodo, si se parte del yodo cristalino. La disponibilidad de los equipos es buena pues son bombas. Los controles son simples pero deben ser frecuentes. El yodo se puede determinar en el agua por titulación amperométrica o por espectrofotometría (LCV) que requieren instrumental adecuado y personal con cierta capacidad y preparación. Es muy simple y menos agresivo que el cloro, no hay problemas con los subproductos de la desinfección y genera residual. Está cuestionado por la sensibilidad que provoca en algunas personas como cambiarle el sabor al café, es bastante más caro que el cloro y su disponibilidad es mucho menor. No hay métodos rápidos de campo. El dicloro isocianurato preparado en solución dosificada a presión atmosférica es de 1 tableta por 200 litros de agua de beber (4 - 6 mg / litro cloruro residual), necesita bombas a diafragma o pistón, es un sistema muy simple y casi automático. No produce los sabores y olores que los otros compuestos de cloro, el residual es fácilmente medible y produce subproductos de la desinfección.

#### **4.1.16 OZONO Y SODIS**

Todos los residuales de ozono pueden ser alcanzados con generadores; ahora bien, según el volumen y la cantidad de agua a tratar, será necesario recurrir a tratamientos de choque y mantenimiento (o únicamente los segundos) estudiando por tanto las almacenamientos de agua necesarios. En recintos de difícil acceso el uso del sistema Sodis para la desinfección del agua con radiación solar es la mejor elección, el cual es muy simple y aceptable por los usuarios, no produce cambios en las propiedades del agua (excepto la temperatura). La desinfección depende de numerosos y variados parámetros, por lo que es difícil estandarizar y asegurar que la desinfección ha sido exhaustiva, no produce efecto residual ni subproductos de la desinfección. El control analítico es difícil pues no hay residual que medir, solamente se puede confirmar la eficiencia con análisis bacteriológico. Los típicos calentadores solares pueden ser confeccionados localmente y hasta por los propios usuarios.

#### **4.2 ESTUDIO COMPARATIVO DE COSTOS**

Debido a la variedad de tipos de sistemas de desinfección y sin entrar en detalles y análisis del funcionamiento de las plantas de tratamiento de agua, manteniendo los procedimientos convencionales o simplificados dependiendo de la calidad del agua cruda, es conveniente clasificarlas por los caudales a usarse en las plantas de tratamiento en nuestro medio, de tal forma que tenemos:

- Plantas Grandes
- Plantas Medianas
- Plantas Pequeñas
- Medio Rural
- Emergencia
- Industrial
- Domiciliario

1. Se entiende por Plantas Grandes, aquellas que abastecen a más de 200 mil habitantes, se encuentran ubicadas en las ciudades grandes y cuentan con laboratorio con personal capacitado en mantenimiento y operación.
2. Se entiende por Plantas Mediana, aquellas que abastecen entre 10 a 200 mil habitantes, se encuentran ubicadas en las ciudades capitales de provincia, cuentan con laboratorio y personal medianamente capacitado en mantenimiento y operación.
3. Se entiende por Plantas Pequeñas, aquellas que abastecen a máximo de 10 mil habitantes, se encuentran ubicadas en las ciudades pequeñas y tienen personal poco capacitado en mantenimiento y operación.
4. Se entiende por Medio Rural, aquellas que abastecen a máximo de quinientos habitantes, se encuentran ubicadas en los poblados y recintos, no tienen laboratorio, ni personal capacitado y de existir la planta es simplificada.
5. Se entiende por Abastecimiento de Emergencia, a aquellos sistemas que abastecen a máximo de 50 habitantes, se encuentran ubicadas en las zonas de alto riesgo y no tienen personal capacitado.
6. Se entiende por Abastecimiento Industrial, a aquellos sistemas que abastecen a la producción pecuaria, ganadera y agroindustria, se encuentran ubicadas en zonas alejadas y tienen personal capacitado en mantenimiento y operación con laboratorios propios y alta tecnología en equipos.
7. Se entiende por Abastecimiento Domiciliario, a aquellos sistemas que abastecen un sistema familiar, no tiene personal capacitado, son sistemas automatizados de fácil operación para bajos volúmenes.

En la realización de costos comparativos entre los diferentes métodos de desinfección del agua, es necesario tomar en cuenta distintos factores en el que se envuelven todas las consideraciones generales para un correcto criterio. Se muestra en la tabla 4-5 un resumen de los desinfectantes de uso más

común en nuestro medio y sus costos por m<sup>3</sup> de agua a desinfectar, cabe resaltar que el valor del ozonizador y cilindros de cloro gas varía dependiendo el tamaño y proveedor, se menciona por referencia.

**Costos comerciales de desinfectantes químicos sin IVA por litro de agua contaminada en concentraciones máximas para un 99% de efecto germicida en 10 min. A 5 °C**

DESINFECTANTE	UNIDAD	COSTO UNIT. (dólares)	Concentración máx. de desinfectante (mg/lit)	COSTO TOTAL (dólares por m <sup>3</sup> de agua)	FUENTE (proveedor)
YODO RESUBLIMADO	Kg	620	1,7	1,054	Merck
YODO METÁLICO	Kg	32	1,7	0,0544	Resiquim
YODO EN SOLUCIÓN	lit	6	0,7	0,0378	Clorosa
BROMO	lit	830	1,5	41,5	Merck
NITRATO DE PLATA	Kg	3120	0,01	156	Merck
HIPOCLORITO DE SODIO (10%)	Kg	0,29	1,5	0,29	Holanda-Ecuador
HIPOCLORITO DE CALCIO (67%)	Kg	2,91	0,3	1,0767	Holanda-Ecuador
DIÓXIDO DE CLORO (A gas)	Kg	1,2	0,4	0,06	Clorosa
OZONO	Kg	1	0,2	0,001	Servimath
CILINDRO PARA CLORO GAS	unidad 68 Kg	700	---	700	Clorosa
EQUIPO OZONIZADOR	Unidad 1g/m <sup>3</sup> /hora	11000	---	11000	Servimath

**Tabla 4-5: Costos Comerciales de Desinfectantes**

**Fuente: Jaramillo C, (2009)**

#### 4.2.1 COSTOS Y FACILIDAD DE APLICACIÓN

Es indispensable que para el análisis de toda la información que se ha podido recopilar respecto del costo y el criterio de facilidad de aplicación serán analizados en forma independiente cada uno de los métodos de desinfección más comunes en nuestro medio considerándose cuatro factores importantes:

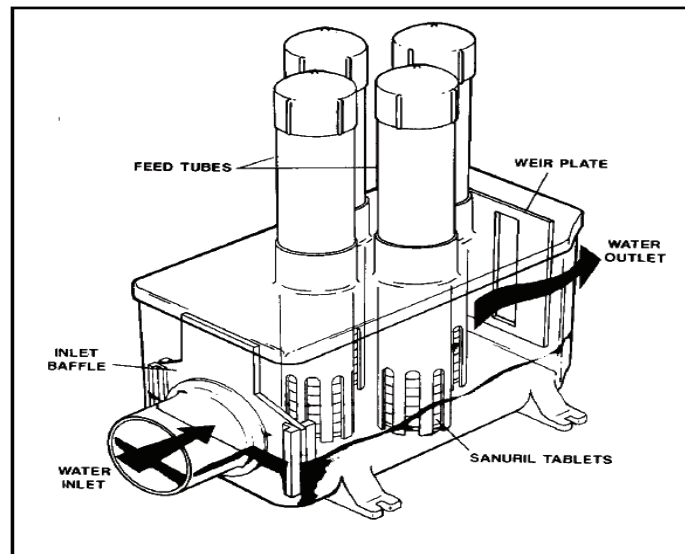
1. Equipo
2. Mantenimiento
3. Dosificación
4. Importación

Empezando por el orden descrito en el ítem anterior tenemos:

##### 1. Tabletas de Hipoclorito de Calcio

Las tabletas de hipoclorito de calcio necesitan de un alimentador de tableta de bajo costo cada tableta tiene un peso de 1kg. y costo de \$4,00 USD; el

alimentador cuesta \$800,00 USD con una garantía de 10 años de vida útil. A este sistema se lo conoce como AQUAWARD, distribuye un flujo de agua especialmente diseñado en el sistema alimentador de tabletas, son singularmente aplicables para las instalaciones remotas. Pruebas de laboratorio y de campo que han mostrado los rasgos y ventajas, confirman su valor como un agente eficaz para la desinfección de agua potable<sup>73</sup>.



**Figura 4-1: Clorador Aquaward**

**Fuente: Exceltec International Corporation. (2009)**

## **2. Cloro obtenido a través de sal por medio de tecnología electrónica**

Estos son equipos pequeños, donde con sal común se puede producir cloro en el sitio para cubrir necesidades domésticas e industriales por un costo de \$2000,00 USD con una garantía de 10 años de vida útil.

El sistema produce hipoclorito "in situ", donde y cuando sea requerida alguna desinfección, estos ligeros y extremadamente portátiles sistemas de cloración están diseñados para ser usados en localidades rurales y/o aisladas donde la purificación del agua, tratamiento de aguas residuales o desinfección de superficie es requerida. Esta tecnología es igualmente útil en aplicaciones de

---

<sup>73</sup> Exceltec International Corporation. (2009), Disinfecting Agent for Drinking Water,

bajo volumen alrededor del mundo: agua potable, piscinas y tratamiento de aguas industriales.

El equipo más común está basado en la tecnología electrónica patentada por Exceltec, llamado SANILEC 6, el mismo produce hasta tres (3) kilogramos (6,6 libras) de hipoclorito por día. Estas unidades son fáciles de operar no requieren entrenamiento especial por parte del operador y su mantenimiento es mínimo.



**Figura 4-2: Clorador Sanilec 6**

**Fuente: Exceltec International Corporation. (2009)**

El sistema elimina la necesidad de transportar, almacenar y manejar el peligroso cloro líquido o gas, a las soluciones concentradas de hipoclorito. Las cuales se degradan fácilmente en el almacenaje. Estos sistemas son ideales en áreas donde el almacenaje químico es un riesgo y/o otros desinfectantes químicos no están disponibles. La inversión inicial es un pequeño tanque, sal y un suministro de corriente eléctrica. Estos sistemas son compatibles con 110, 220 o 240 voltios, fase simple y 50 ó 60Hz.

### **3. Plantas Generadoras de luz Ultravioleta**

Las plantas con desinfectante de ultravioleta son por lo general equipos pequeños. El costo de las lámparas de UVC ( $\lambda = 180 - 200 \text{ nm}$ ) de 45 vatios es de \$80,00 USD y tiene la longitud máxima de 60cm., es decir, para cubrir necesidades domésticas y semi-industriales con el uso de 2 paredes de ellas

funcionando en paralelo: sin embargo, al igual que el ozono presenta la desventaja de no poseer un valor residual que garantice su buen estado al consumidor, de allí que los desinfectantes de ultravioleta sean muy utilizados y mayormente comercializados en el nivel doméstico y para determinados procesos de la industria alimenticia<sup>74</sup>.

Con los rayos ultravioletas se obtiene una eliminación completa de los virus, a condición de que se apliquen sobre una capa de agua de poco espesor, con una potencia suficiente y renovando las lámparas antes de que acusen una fuerte pérdida de su poder emisor. El agua debe ser clara, sin turbiedad ni color, desprovista de hierro de coloides orgánicos o de microorganismos planctónicos, ya que estas impurezas podrían formar sedimentos sobre los tubos, que reducirían considerablemente la penetración de los rayos. Si se cumplen estas condiciones, toda célula viva, activa o esporulada, ataca por los rayos ultravioletas, muere o, al menos, no puede reproducirse o actuar sobre el medio ambiente. Solo se consigue una seguridad total de tratamiento con una instalación ampliamente dimensionada, bien controlada y mantenida, y utilizada con agua de calidad constante a lo largo de todo el año, son pues evidentes las dificultades para tratar grandes volúmenes.

Aproximadamente 56% de las instalaciones alternativas al cloro se pronostican serán tecnologías UV, las cuales 20% del mercado será para un subministro municipal de agua. En general, el mercado de Estados Unidos para equipos y sistemas de desinfección UV aumentará de \$20 millones a \$100 millones de 1995 al 2009. Los equipos de desinfección UV constituían un 2.4% estimado del mercado total americano de equipos para el tratamiento de agua de 1994 y la tasa de crecimiento del mercado se predice que es entre 12.8 y 14%<sup>75</sup>.

Los costos de uso de un UV para desinfección primaria han sido comparados con los costos de usar cloro u ozono. Dado que se requiere un desinfectante residual para los sistemas de distribución de América del Norte, los costos se

---

<sup>74</sup> Wright H. y Cairns W., Desinfección del agua por medio de luz ultravioleta, Trojan Technologies Inc., Ontario, Canadá.2002.

<sup>75</sup> Frost & Sullivan, (1995). US Water Treatment Equipment Markets, Mountain View, California,

basaron en la complementación de la desinfección ultravioleta con cloro como desinfectante secundario<sup>76</sup>.

Se asumió una concentración residual de 1 mg/l basada en las reglamentaciones. Los costos de ozonización están basados en una dosis de 1mg/l y la asunción de un tiempo de contacto de 10 minutos. Los costos de cloración están basados en una dosis de 5 mg/l con la asunción de una concentración residual encima de 0.5 mg/l y un requisito de mano de obra de 7 a 10 horas por semana. A una dosis de 40 mW/cm<sup>2</sup> sobre un rango de 64 lpm (litros por minuto) a 6.813 m<sup>3</sup>/día los costos totales de UV mas cloro residual fueron de USD 44.9 centavos/m<sup>3</sup> a USD 2.6 centavos/m<sup>3</sup> y nunca excedieron los del ozono o cloro solos<sup>77</sup>.

La EPA concluye que los costos de usar UV a una dosis de 40 mW/cm<sup>2</sup> eran mucho más bajos que los correspondientes al uso de ozono o cloro para caudales comprendidos entre 64 lpm a 6.913 m<sup>3</sup>/día. Cuando no se requiera un desinfectante residual, los costos totales serán menores. La EPA de los Estados Unidos de América (1996) concluye que la desinfección ultravioleta es una tecnología económicamente viable y adecuada especialmente para sistemas pequeños de agua. Basados en los costos de energía y de capital en diferentes países y regiones del mundo, el promedio estimado anualizado de sistemas comparables puede variar tanto como 50 %.

#### **4. Criterios de desinfección del agua con ozono**

Con la desventaja de no tener efecto residual y un costo relativamente alto al corto plazo, su desarrollo en nuestro medio se ha cerrado para usos específicos y nivel económico, tales como, medicina e industria alimenticia (aprobadas por la FDA en abril de 1958); los campamentos petroleros y distintas ONG's que trabajan en comunidades.

---

<sup>76</sup> USEPA, (1997). Community Water System Survey, Washington, DC,

<sup>77</sup> USEPA, (1996). Ultraviolet light disinfection technology in drinking water application, Washington, DC,



Los costos de equipos ozonizadores varía entre \$300,00 y \$5000,00 dólares americanos y el consumo de energía de los mismos dependen del tamaño, cantidad de ozono que genera y el volumen de agua a desinfectar<sup>78</sup>. Por ejemplo, en uso domiciliario: para desinfectar 20 litros de agua, se necesita conectar el equipo que genera una concentración de 20 µg de O<sub>3</sub>/100ml durante 5 minutos con el consumo de cien vatios de potencia eléctrica.

Considerando que el equipo tiene un costo de \$300,00 con tiempo de vida útil de 5 años, a un caudal de 4 lpm y el consumo de energía cuesta USD 0.11 dólares/ cada Kw/h, los costos totales son de USD 0.95 centavos/m<sup>3</sup>. Para aplicación industrial, los costos de ozonización están basados en una dosis de 1mg de O<sub>3</sub>/l y la asunción de un caudal de 1lpm los costos totales son aproximadamente de USD 19.63 centavos/m<sup>3</sup> (No se consideraron costos de mano de obra y mantenimiento durante el periodo de vida útil).



**Figura 4-3: Ozonizador**

**Fuente: Biomagnetix. (2009)**

Es necesario resaltar que el costo de mantenimiento y capacitación en estos equipos es el menor con relación a todas las formas de desinfección ya antes mencionadas<sup>79</sup>. Mayores eficiencias en el consumo de energía se obtienen en instalaciones grandes, así en un modelo estándar se tiene que en generación de ozono de 13 a 18 Vatios hora / gramo de O<sub>3</sub>. Teniéndose un total de consumo promedio entre 18 y 30 Vatios hora / gramo de O<sub>3</sub>.

<sup>78</sup> Servimath Cia. Ltda. y Ordóñez Cia. Ltda. (2009), Manuales de Usuario.

<sup>79</sup> José de Acevedo Netto, (1992), Desinfección con Ozono, CEPIS

A más de todas sus ventajas, los Generadores de Ozono, tienen bajo consumo de electricidad. Generalmente 10Kw-h de electricidad generan una libra de ozono, al comparar esto con la producción de la misma cantidad de cloro 1 a 2 Kw-h; a más de esto aumenta el costo por transporte, empaque, bodegaje y seguridad que necesita el cloro; comparando estos costos con el costo de la Generación de Ozono, resulta ser éste más económico; porque generalmente el cloro no se fabrica en el lugar; además hay una gran oportunidad de mejorar la eficiencia de la ozonización, especialmente de la manera en que se está desarrollando<sup>80</sup>.

#### **4.2.2 COSTOS DE TRATAMIENTO DE AGUA EN CASO DE EMERGENCIA.**

De los costos que implica la desinfección de agua en casos de emergencia, existe 2 tipos de desinfectante de uso inmediato, manejo sencillo y de fácil acceso: el cloro y el yodo.

El Cloro: En el mercado nacional se expende el cloro comúnmente de dos formas: líquida que corresponde a soluciones de hipoclorito de sodio (blanqueadores y desinfectantes) en diferentes concentraciones de cloro activo con un promedio de 23 g/l y como sólido el que corresponde al hipoclorito de calcio (HTH 60% como el cloro activo). Sin embargo, puede usarse directamente el ácido hipocloroso (HOCl) directamente en gotas conocido comercialmente como NEUTRODERM. La dosificación del hipoclorito de sodio al 5% es de 120 cm<sup>3</sup> por cada 1000 litros de agua (1m<sup>3</sup>) con un tiempo de contacto de 30 minutos.

Para efecto de estudio de la demanda se considera como dosis necesaria:

Aguas claras: 0,3 mg/l

Aguas turbias: 1.5 mg/l

---

<sup>80</sup> Paz, A., (2007), "Primera planta potabilizadora con ozono". Trabajo presentado al VII Congreso Nacional de Ing. Civil, Guadalajara (México),

Se asume que el consumo de agua para bebida en una unidad familiar de seis personas es de 15 litros diarios (2 litros/persona)<sup>81</sup>.

Producto	Diario	Mensual	Anual
NaOCl	0. 2 ml	6 ml	72 ml
Ca <sub>2</sub> (ClO) <sub>2</sub>	0. 01 g	0. 3 g	3. 6 g

**Tabla 4-6: Demanda De Cloro para Aguas Claras**

**Fuente: Muñoz M. – Balarezo A., (1992)**

Producto	Diaria	Mensual	Anual
NaOCl	1 ml	29 ml	360 ml
Ca <sub>2</sub> (ClO) <sub>2</sub>	0. 04 g	1.13 g	13.5 g

**Tabla 4-7: Demanda De Cloro para Aguas Turbias**

**Fuente: Muñoz M. – Balarezo A., (1992)**

El Yodo: En el mercado se lo adquiere en forma de tintura de yodo en presentaciones de 120, 60 y 20 ml principalmente en tiendas y farmacias. Las dosis de yodo necesarias son:

Aguas claras: 0.7 gts/ l

Aguas turbias: 1,7 gts/ l

Se asume que el consumo de agua para bebida en una unidad familiar de seis personas es de 15 litros diarios (2 litros/persona). Teniéndose que la demanda de yodo es:

Producto	Diaria	Mensual	Anual
Tintura de yodo	0. 5 ml	15.8 ml	189 ml

**Tabla 4-8: Demanda De Yodo para Aguas Claras**

**Fuente: Muñoz M. – Balarezo A., (1992)**

Producto	Diaria	Mensual	Anual
Tintura de yodo	1. 3 ml	38.3 ml	460 ml

**Tabla 4-9: Demanda De Yodo para Aguas Turbias**

**Fuente: Muñoz M. – Balarezo A., (1992)**

<sup>81</sup> Muñoz M. – Balarezo A., (1992). Métodos alternos de desinfección de agua para bebida y preparación de alimentos en el área rural, Ed. EPN-FIC, Quito,

En el mercado existe una diversidad de productos especialmente de cloro así:

- El hipoclorito de calcio se expende en forma granular, en funditas que varían de 5 a 6 g, de fácil adquisición en abastos y farmacias, con precios que oscilan entre 0.25 y 0.30 centavos de dólar el gramo.
- El hipoclorito de sodio es el de mayor venta por cuanto se tiene una gran variedad, ya que se lo expende como blanqueador de ropa y desinfectante, viene en presentaciones de 0,5 litro, 1,0 litro y de 1,0 galón; a un precio promedio de 0.50 centavos/litro.

De acuerdo a las dosis recomendadas tanto para aguas claras como para aguas turbias, se han estimado que los costos por insumos y costos indirectos (30% adicional en los que se incluyen los rubros por concepto de administración, transporte, operación, etc.) para el sector rural a nivel domiciliar serían los siguientes:

Insumo	Diario	Mensual	Anual
Hipoclorito de sodio	0.30	9.20	110.50
Hipoclorito de calcio	0.20	6.00	70.00
Tintura de yodo	7.60	297.00	3563.00

**Tabla 4-10: Costos Desinfección en USD para Aguas Claras**

Fuente: Muñoz M. – Balarezo A., (1992)

Insumo	Diario	Mensual	Anual
Hipoclorito de sodio	1.50	45.30	543.00
Hipoclorito de calcio	0.73	22.00	265.00
Tintura de yodo	18.50	555.00	6655.40

**Tabla 4-11: Costos Desinfección en USD para Aguas Turbias**

Fuente: Muñoz M. – Balarezo A., (1992)

Observándose que el costo del producto en sí no representa un mínimo desembolso dentro de la economía familiar y aún si se considera el rubro de salud y seguridad que se obtiene al consumir un agua adecuadamente desinfectada en un caso de desastre donde estos productos se encuentran con suma facilidad en los hogares.

### 4.3 COMPARACIÓN DE SU APLICABILIDAD EN SISTEMAS CONVENCIONALES

Un estudio brasileño de costos<sup>82</sup> comparo el costo de: cloro líquido e hipoclorito de sodio. Los costos se compararon con base en equipo, transportación, instalación y operación y mantenimiento para dosis y capacidades de planta que variaban de 1 a 5 mg/l y 170 a 83.400 m<sup>3</sup>/día, respectivamente.

Los costos de los componentes y los costos totales para una dosis de cloro de 1 mg/l se presentan en la tabla 4-12.

		Gasto (m <sup>3</sup> /día)						
	Costo del componente	170	430	810	4300	8600	43200	86400
<b>Hipoclorito de sodio</b>	Hipoclorito	7,8	19	39	190	390	1900	3900
	Equipo	34	34	34	34	34	34	34
	Transporte	21	52	100	521	1000	5200	10000
	Recipiente	2,1	4,2	7,3	32	65	330	650
	Instalación	17	17	21	84	210	340	690
	Total	82	130	200	860	1700	7800	15000
	<b>Cloro líquido (40Kg)</b>	Cloro	2,5	6,5	13	64	130	645
Equipo		100	100	100	100	100	100	100
Transporte		3,7	98	2.0	9,7	20	198	200
Recipiente		11	11	11	39	72	360	720
Instalación		25	25	25	25	25	33	59
Total		140	140	150	240	350	1200	2400
<b>Cloro líquido (900Kg)</b>	Cloro	1,4	3,5	7,1	35	71	350	710
	Equipo	400	400	400	400	400	400	400
	Transporte	2,7	69	1,4	6,8	14	68	140
	Recipiente	72	72	72	72	72	140	220
	Instalación	84	84	84	84	84	84	84
	Sistema para mover los cilindros	110	110	110	110	110	110	110
	Total	670	670	670	710	750	1200	1700

**Tabla 4-12: Costos Comparativos en USD**

**Fuente: Macedo y Noguti, (1998)**

<sup>82</sup> Paz, A., (2007), "Primera planta potabilizadora con ozono". Trabajo presentado al VII Congreso Nacional de Ing. Civil, Guadalajara (México).

Se pueden apreciar los costos comparativos (dólares) de cloro líquido (recipientes de 40 y 900 Kg) e hipoclorito de sólido para una dosis de cloro de 1 mg/l. El hipoclorito de sodio demostró ser menor en costo a capacidades de planta menores de 500 m<sup>3</sup> / día.

En la tabla 4-12 se enlistan los requerimientos de sales y energía de varios equipos patentados estadounidenses para generación de hipoclorito en plantas por electrolisis. Si los costos de energía son de \$ 9.6 centavos de dólar y los de las sales de \$ 10 dólares por tonelada, los costos de sales y energía son de \$9.6 a \$14 centavos de dólar por libra de hipoclorito de sodio<sup>83</sup>. Por supuesto a esto se deben agregar los costos de reemplazo de electrodos y los de la mano de obra. Los costos son considerablemente menores que los del hipoclorito de calcio si se compara con la tabla 4-11, y en instalaciones pequeñas se comparan favorablemente con el costo del cloro líquido.

Tipo de sal Nombre comercial	Energía Kw.h/lb de Na	Sal lb/lb de NaOCl
Ionics "Colormat"	1,7	2,1
Engelhard "Choropac"	2,8	(Agua de mar)
Pepcon "Pep - Clor"	3,5	3.25
Diamond Shamrock "Sanilec"	2,5	3,05

**Tabla 4-13: Requerimientos de Energía y Sales**

**Fuente: Macedo y Noguti, (1998)**

#### 4.3.1 ANÁLISIS DE LAS FORMAS DE APLICACIÓN EN NUESTRO MEDIO

De la información recopilada y sobre la base del criterio técnico, la aplicabilidad del tipo de desinfección, depende directamente del área poblada a suministrarse de agua potable, es decir, del caudal de la planta de tratamiento. Revisar tablas del anexo 4.

De tal forma que se considerará caudal pequeño de hasta 5 l/seg. (500 m<sup>3</sup> /día) y gran caudal mayor a 10 l/seg.

<sup>83</sup> Culp G. y Culp R., 1974, New Concepts in Water Purification, Van Nostrand Reinhold, New York, Pág. 195

a. Para el caudal pequeño de preferencia en poblados rurales o campamentos las técnicas de desinfección del agua que se utilizan son las siguientes:

- Para un pueblo cuya fuente de agua potable es suministrada por una entidad o empresa pública por lo general es de dos tipos:
  1. Hipoclorito de calcio en forma de tabletas para dosificador.
  2. Hipoclorito de sodio se aplica cada cierto tiempo en un volumen fijo.
- Para campamentos de empresas privadas por lo general son dos tipos de desinfección las más comunes y una en casos muy especiales:
  1. Cloro obtenido a través de sal por medio de tecnología electrónica.
  2. Plantas generadoras de ozono instaladas in situ y cloro.
  3. Uso de luz ultravioleta (en la gama de longitud de onda  $\lambda=180-200\text{nm}$ ) y el uso de cloro conjuntamente para tener un valor residual.

b. Para grandes caudales, que son administrados por empresas públicas o mixtas, por lo general se utiliza dos tipos de desinfectantes:

1. Hipoclorito de calcio en forma granular.
2. Cloro gas en cilindros de distinta capacidad, por lo general 68 – 70 kg.

Las cloraminas reducen y llegan a eliminar los sabores que podrían encontrarse en un tratamiento solo con cloro. Pueden ser eficaces, aunque no siempre, cuando se requiere eliminar el sabor a clorofenoles; son mucho menos activas como desinfectantes que el cloro.

El riesgo de mal sabor en el agua se reduce al mínimo cuando se efectúa la desinfección ligeramente por encima del punto crítico, a continuación de que la dosis de cloro residual a la salida de la instalación, no sea demasiado elevada; en este caso para eliminar el sabor a cloro, sería necesaria una reducción parcial con hiposulfito o, aun mejor, dióxido de azufre.

Puede emplearse también cloro o hipoclorito antes de un tratamiento final sobre carbón en grano, que elimina las materias orgánicas que producen los

sabores y cataliza la reducción del cloro en exceso. Después de la filtración sobre carbón activado, puede efectuarse una adicción suplementaria de cloro, en una dosis muy pequeña, destinada a mantener cloro residual en la red de distribución, sin peligro de malos olores, a menos que se deban a las mismas conducciones, a su revestimiento, o a sus sedientos anteriores.

La cloración complementaria puede realizarse por cloraminas o con dióxido de cloro. La acción del cloro está muy influenciada por el pH; cuando más elevado es este, mayor es la dosis de cloro residual que debe mantenerse para obtener la misma eficacia, con un mismo tiempo de contacto. Debe tenerse en cuenta este factor cuando se efectúa una neutralización para elevar el pH del agua filtrada.



## **CAPITULO 5:**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 CONCLUSIONES:**

Para el uso real en nuestro medio y en comunidades de países en desarrollo se concluye el uso de los siguientes sistemas de desinfección considerando su complejidad, factibilidad de insumos, disponibilidad de equipos, costos de operación, mantenimiento y preparación de personal:

1. Plantas de tratamiento grandes, los sistemas de desinfección de agua serán de cloro gas, hipoclorito de calcio y dióxido de cloro.
2. Plantas de tratamiento medianas, los sistemas de desinfección de agua serán de cloro gas y el hipoclorito de calcio.
3. Plantas de tratamiento pequeñas, los sistemas de desinfección de agua usada es el hipoclorito de calcio.
4. En Medio Rural el sistema de desinfección adecuado es el Hipoclorito de Calcio y la Electrolisis in situ.
5. En situaciones de emergencia y de desastre el sistema de desinfección adecuado es el Hipoclorito de Sodio, sistema SODIS y dispositivos para la erosión de tabletas en cisternas de uso comunitario.
6. En el uso industrial tendríamos la aplicación de bromo, yodo, nitrato de plata, ozono, ultravioleta y el uso de pastillas de dicloro isocianurato.
7. En sistemas de uso familiar una excelente aplicación con la plata coloidal, el ozono, pastillas de dicloro isocianurato y dispositivos para la erosión de tabletas en cisternas de uso domiciliario y piscinas.

## 5.2 RECOMENDACIONES:

Debido a la complejidad en la toma de decisiones para el uso de cada uno de los desinfectantes estudiados, se ha realizado una serie de recomendaciones en base a distintos parámetros que permitirían una fácil elección de los desinfectantes a usar.

Distinguiendo por el tipo de sistema a usar en flujo continuo, en situaciones de emergencia y desastre, para pequeñas comunidades y para sistemas domiciliarios con uso familiar, tenemos que:

1. Plantas de tratamiento grandes y de ciudades económicamente muy fuertes, es recomendable que los sistemas de desinfección de agua sean de ozono, ultravioleta y dióxido de cloro, pues se necesita accesibilidad de repuestos y mantenimiento con personal capacitado, ya que este tipo de desinfección es restrictivo para países en desarrollo por el alto costo para su puesta en operación a gran escala y el requerimiento de proveedores externos especializados, paradójicamente es muy simple su equipo básico pero de gran complejidad dependiendo del grado de seguridad buscado, en especial el dióxido de cloro por el peligro que representa su manipulación.
2. Plantas de tratamiento pequeñas los sistemas de desinfección más usados y recomendables son el cloro gas y el hipoclorito de calcio, la fácil importación de la materia prima, la sencilla manipulación del producto y requerimiento de personal capacitado para la operación y mantenimiento. Hacen versátil y aplicable para países en vías de desarrollo.
3. Se recomienda en situaciones de emergencia y de desastre el sistema de desinfección adecuado es el Hipoclorito de Sodio, por su facilidad de operación, manejo y adquisición. La seguridad que presenta y el poco o ningún entrenamiento para su aplicación lo convierten en el desinfectante ideal.

4. En sistemas de uso familiar una excelente aplicación es la plata coloidal y el ozono. En el mercado existen gran variedad de dispositivos para mejorar la calidad del agua, en cuanto a la desinfección se refiere, disponiendo de recursos que lo permitan pueden ser usados en campamentos a nivel domiciliario de manera que no necesite capacitación en el manejo y su operación sea en extremo sencilla. Contando con un fluido de energía eléctrica que garantice su operatividad la eficiencia es muy alta.
5. Se recomienda en pequeñas comunidades al único sistema que se ajusta a las condiciones de capacitación y eficiencia es el hipoclorito de calcio y la electrolisis in situ, el cual permite que la operación y mantenimiento se maneje adecuadamente, para dosificar en un flujo continuo con tanques de mezclado sin mayor preparación del personal.
6. En el uso industrial se recomienda la aplicación de bromo, yodo, nitrato de plata y dicloro isocianurato.
7. Se recomienda el uso de pastillas de dicloro isocianurato y dispositivos para la erosión de tabletas en cisternas de uso domiciliario y piscinas, en agua para uso agrícola y ganadero.
8. Se recomienda incorporar una instalación de desinfección por ozono, en todos los casos, como último eslabón de tratamiento para garantizar y asegurar la calidad total de agua obtenida.
9. Se recomienda el uso de cloro, hipocloritos sódico y cálcico, si el agua no contiene materiales orgánicos o contaminantes químicos capaces de formar compuestos que den mal sabor al agua.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Berg, G., (Dic. 1971). "Integrated approach to problems of viruses in water", Jour.of San. Eng. Div., ASCE,97 (SA6): 267,
2. Berg, G., (Jul. 1966). "Virus transmission by de water vehicle – 3 – Removal of viruses by water treatment procedures. Health Lab. Science, 3: 170,
3. Berg, R.W. & Sproul, O., (Nov. 1967) "Viricida effects of chlorine in wastewater. J. WPCF 39: 1835,
4. Black, A.P., Thomas, W.C., Jr.; Kiman, R.N., Bonner, W.P., Keirn, M.A.; Smith, J.J., Jr.& Javero, A.A., (Ene. 1968). "Iodine for disinfection of water". J. AWWA, 60:69,
5. Borcrardt J.- Walton G., (°Ct. 1951).Calidad del agua, New York, 1991, Págs. 1-16.
6. Bueloww, R.W.& Walton, G., (Ene. 1971). "Bacteriological quality and residual chlorine J. AWWA, 63:28,
7. Burtshell, R.H. Rosen, A.A., Meddleton, F.M.& Morris, B.E., (Feb. 1959). "Chorine derivatives of phenol causing taste and odours" .J AWWA, 51:205,
8. Butterfield, C.T.& Wattie, E., (Feb. 1946). "Influence of pH and temperature on survival of coliforms and enteric photogenic when exposed to chloramines". Public Health Report, 61:157,
9. Butterfield, C.T. (Jul. 1948). "Bactericidal properties of chloramines and chlorine in water", Public Health Report, 63:934,
10. Butterfield, C.T. Wattie, E.; Megregian, S.& Chambers, C.W., (Dic. 1943). "Influence of pH and temperature on the survival coliforms and enteric pathogens when exposed to free chlorine. Public Heart Reports, 58:1837,
11. Cáceres O., (1971). "Manual para la desinfección de agua mediante cloración". Ministerio de salud, Dirección General de Servicios Integrados de Salud, Perú,
12. Carlson G.F., Jr.; Woodard, F.E.; Wentworth, D.F.& Sproul, O.J., , (Feb. 1968). "Virus inactivation on clay particles in natural waters". J. WPCF, 40: R89
13. CEPIS, (1991). Abastecimiento de aguas y disposición de excretas., Ed. Lima. Perú.
14. CEPIS – OPS – CIFCA, (1977).Curso sobre tecnología de tratamiento de agua para países en desarrollo, Lima,
15. Chambers, C.W.; Chambers, L.A. & Kabler, P., (Nov. 1953). "New Colloidal silver disinfectant". Industrial Eng. Chem., 45:2569,
16. Chang, S.L.& Morris, J.C., (1953). "Elemental iodine as a disinfectant for drinking water". Ing. Eng. Chen. 45:1009,
17. Ghang, S.L. (1968). "Waterborne viral infections and their prevention". Bol. OMS, 38:401,
18. Chang, S.L., (1971). "Modern concepts of disinfection". J. Sang. Eng. Div. ASCE, Pr°C. ASEC, 97 (SA5),
19. Chauduri, M. & Engelbrecht, R.S., (Sept. 1970). "Removal of viruses form water by chemical coagulation and removability". J. AWWA, 62:563,
20. Clarke, N.A. Berg, G.; Kabler, P.W.& Chang, S.L., (Sept. 1962). "Human enteric viruses in water, source, survival and removability". Londres, International Conference on water Pollution Research,

21. Clarke, N.A.& Klaber, P.W., "The inactivation of purified coxsackie virus in water by chlorine" . The Am. J. Of Hygiene, 59:119, (Ene. 1954).
22. Clarke, N.A.; Stevenson, R.E.& Klaber, P.E., (Jun. 1956). "Survival of coxsackie virus in water and sewage" .J.AWWA, 48:677,
23. Cliff J. Kirchmer, Desinfección, CEPIS, Lima, 1977.
24. Departamento de sanidad de New York, (1991), Manual de tratamiento de aguas, Limusa, México, págs. 76 – 77.
25. Dennis, J.M.- 1955- 1956. (°Ct. 1959). "Infectious Hepatitis Epidemic in Delhi, India" .J. AWWA, 51:1288,
26. EPA, (1990).Technologies for Upgrading Existing or Designing New Drinking Water Treatment Facilities.
27. EPA, (1990).Environmental Pollution Control Alternatives: Drinking Water Treatmen for Small Communities.
28. Fair, GG.M.; Geber, J.C.& Okun, D.A., (1968). "Water and wastewater engineering". Vol. 2,
29. Fair, G.M.; Morris, J.C.; Chang, S.L; Weil, I.& Burden, R.P., (°Ct. 1948). "The behaviour of chlorine as a water disinfectant ". J. AWWA, 40:1051,
30. Geldreich, E.E., (Dic. 1970). "Microbiological quality in potable waters". Course on water and sewage disinfestations. Brazil, Univ. De Sao Paulo,
31. Gomella, C., (Ene. 1972) "Ozone practices in France". J. AWWA, 64:39,
32. Green, D.E.& Stumpf, P.K., (Nov. 1946). "The mode of action chlorine". J. AWWA, 38:1301,
33. Griffin, A.E., (Jun. 1954). Chloration – a ten years review. J. NEWWA, 68,
34. Hann, V.A., (Feb. 1942). "Disinfection of drinking water with ozone". J. AWWA, 34:275,
35. Harvill, C.R.; Morgan, J.H.& Mauzy, H.L., (Feb. 1942). "Practical application of ammonia induced break point chloration .J. AWWA, 34:182,
36. Harris, C.W., (Mar. 1972). "Ozone disinfection". J. AWWA, 64:182,
37. IDRC, (1988).Solar Water Disinfection. Montreal Canada.
38. Ingols, R.S.& Gaffeney, P.E., (Nov. 1964). "Biological studies of halophenols". Oklahoma Industrial waste conference. Oklahoma state University,
39. Jolley, R.L., y Wilson W., (May. 8, 1977). "Chloride organic in surface water sources for potable water". Proceedings AWWA. Seminar on Disinfection.
40. Jolley, R.L., (1978).Water chloration. Enviromental Impact and Health Efects. Vol. L. Ann Arbor Science, Publishers Inc.
41. Jorge Arboleda Valencia, (1992),Teoría y Práctica De La Purificación del agua, Bogota, Ed.Acodal, Págs. 585-645.
42. Klaber, P.W.; Clarke, N.A.; Berg, G. Y Chang, L.S., (Jul. 1961). "Viricidal efficiency of disinfectants in water. Public Health Reports, 76:565,
43. Klaber, P.W., (Jul. 1951). "Relative reinstance of coliform organisms and enteric pathogens in disinfection of water with chlorine". J. AWWA, 43:553
44. Kelly, S. & Sanderson, W.W., (Jun. 1959). "The effect of sewage treatmen on viruses". Sewage and Industrial wastes, 31:683,
45. K°Ch B., Krasmer S.W. y otros. (°Ct. 1991) "Predicting the formation of DBPs by simulated distribution system. Journ AWWA, Vol. 83, pag. 62
46. Lee, CF. (1967). Kinetic of reactions between chlorine and phenolic compounds. Principles and applications of water chemistry. Weley & Son, Inc. N.Y.

47. Manwaring J.F.; Chadhuri, M.; Engelbrecht, R.S. (May. 1971). "Removal of viruses by coagulation and flocculation". J. AWWA. 63:298,
48. Mclean, D.M.; Crown, J.R. y Laak, R., (Jul. 1966). "Virus dispersal by water" . J. AWWA, 58:920,
49. Merk, (1996). Ficha de datos de seguridad, Darmstadt Alemania,
50. Moore, A.W.; Megregian, S. & Ruchhoft, C.C., (°Ct. 1943). "Some chemical aspects of ammoniachlorine treatment of water". J. AWWA, 35:1329,
51. Muñoz M. – Balarezo A., (1992). Métodos alternos de desinfección de agua para bebida y preparación de alimentos en el área rural, Ed. EPN-FIC, Quito,
52. Murin, C.J., (Aug. 1973). "Water research association" Activated carbon in water treatment. Papers and proceedings of the conferences at the University of Reading.
53. Neefe, J.R., Ttofés, J., Baty, J.B. & Reinhold., J.G., (1976). "Disinfection of water containing causatives agent of infection (Epidemic) hepatitis". J. AWWA, 238
54. Paz, A., (2007), "Primera planta potabilizadora con ozono". Trabajo presentado al VII Congreso Nacional de Ing. Civil, Guadalajara (México),
55. Reid, L.C. & Carlson, D.A., (Apr. 1974). "Chlorine disinfection of low temperature waters. Journal of environment Engineering Division. Proceedings of ASCE, 100:339.
56. Robeck, G.G., Charke, N.A. & Dostal, K.A., (°Ct. 1962) "Effectiveness of water treatment processes in virus removal". J. AWWA, 54:1275,
57. Sastry, C.A., Aboo, K.M, Kare, G.K... & Rao, M.N., (1969) "Removal of bacteria from water by coagulation". Environmental Health. India,
58. Sastry, C.A., Aboo, K.M. & Rao, M.N., (1969). "Incidence of coliforms and enterococci in natural waters". Environmental Health, 11:32, Indica,
59. Schulz C. – Okun D., (1990). Tratamiento De Aguas Superficiales Para Países En Desarrollo, Ded. Noriega- Limusa, México,
60. Singley E., (1988). "Taller Internacional sobre actualización en desinfección del agua". ACODAL Seccional Valle del Cauca. Memoria.
61. SOLSONA FELIPE, (1990). Disinfection for Small Water Supplies., Ed. ALDHEA ADEY.
62. Somerville, R.C. & Rempel, G., (Jun. 1972). "Ozone for supplementary water treatment". J. AWWA, 64:377,
63. Sproul, O.J., (Ene. 1972). "Virus inactivation by water treatment". J. AWWA, 64:31,
64. Stainuk, W.N. Hetling L.J. & Shuster, W.W. (Aug. 1974). "Nitrogen removal by catalistaided breakpoint chloration. Journal WPCF, 26:1976
65. Taras, M.J., (Ene. 1953). "Effect of free residual chloration on nitrogen compounds in water". J. AWWA, 53:47,
66. Taras M.J., (May. 1950). "Preliminary studies on the chlorine demand of specific chemical compounds". J. AWWA, 42:462,
67. Teefy, S.M. Y Singer, P.C. (Dic. 1989). Performance and analysis of tracer test to determinate compliance of a disinfection Scheme with SWTR.J. AWWA 82:12, pag. 88,
68. Thayer, S.E. & Sproul, O.J., (Ago. 1966). "Virus inactivation in water softening precipitation processes". J. AWWA, 58:1063
69. Thorup, R.T., Nixon, F.P., Wentworth, D.F. & Sproul, O.J., (Feb. 1970). "Virus removal by coagulation with polyelectrolites". J. AWWA, 62:97,

70. Tuepker, J.L., (1969). "Chloration of high pH waters; Panel Discussion ". Ann AWWA, Mtg, San Diego, California
71. Unda, F. Y Colaboradores. (1968). Yodación de agua potable, experiencia chilena. Trabajo presentado al XI Congreso Interamericano de Ing. San.
72. Viruses in Water, (°Ct. 1969). Committee Report, J. AWWA, 61:491,
73. Walters, J.V. & Holcomb, R.R., (Aug. 1966). "Isolation of eiteric pathogen sewage borne nematodes. Presented at 5 th annual meeting of the SOcIety of Nematologistsm Paytona Beach, Florida,
74. Walton, G., (1961). "Effectivess of water processes. Public Health Service. Pub. 898, Robert Taft San. Eng. Cante,. Cincinnati, Ohio,
75. Walton G., (°Ct. 1956). "Relation of treatment method to limits coliform organism in water". J. AWWA, 48:1281,
76. Wattie, E. & Butterfied, C.T., (Dic. 1944). "Relative resistance of Escherichia coli and Ebertella typhosa to chlorine and chloramines". Public Health Reports, 59:1661,
77. Weber, G.R., (Abril 1950). Effect of concentration and reaction (pH) on germicidal actibity of chloramines". Public Health Reports. 65:503,
78. Wen Tung Wei Irvin, engelbrecht, R.S. & Asustin, J.H., (Feb. 1969). "Removal of nematodes by raped sand filtration. Journal of Sanitary Engineering Division. Proceedings of ASCE, SA1,
79. White, C., (1985). "Handbook of chloration". Segunda edición. Van Nostrand Reinholds Co.,
80. White Clifford, (1985). The Handbook of Chlorination. Segunda edición. De, VNR. Nueva York.
81. Whitte, C., (May. 1968). "Chloration and dechlorination: a scientific and practical approach. J. AWWA, 60:540,
82. White G.C. (Jun. 1974). "Disinfection: the las line of defense for defense for potable water". Paper present at the AWWA Conference
83. Williams D.B. (Jun. 1971). "Viruses in water supply are present treatment practices adequate" Willing Water AWWA,
84. Williams, D.B. (°Ct. 1951). "The organic nitrogen problem" J. AWWA, 43:837,
85. Williams, D.B., (Feb. 1966). "Elimination of nitrogen trichlorine in dechloration practice. J. AWWA, 58:248,
86. Williams, D.B., (Sept. 1963). "Control of free residual chlorine by ammoniation". J. AWWA, 55:1195,
87. Le chavalier, M.W., Becker W.C., Shorr, P., y Ramon G.L. (Abr. 1992). "Evaluating the performance of biological active filters" Journ AWWA 84:136
88. Nedem D.C., Jones R.C., Jones R.J., Smith J.R. Wirmayer G.J. y Foust G.W. (Jul. 1992). "Comparing Chlorination and Chloration for Controlling Bacterial Regrowth" Jour AWWA, Vol. 84 pag. 80
89. Palin A.T., (1957). "The determination of free and combined chlorine in water by the use of diethyl – p – phevylyene diamine". J. AWWA, 49:873,
90. Palin A.T. (1968). "Determination of nitrogen trichlorine in water". J. AWWA, 60:847,
91. Marks, H.C. & Glass, .B.P. (1942). "A new method of determining residual chlorine", J. AWWA 34:1227,

## **ANEXOS**



# ANEXO No 1

## DESINFECCIÓN POR RADIACIÓN SOLAR

ENSAYO No 1

FECHA: 25.09.92

HORA: 9h00

CF/100ml INICIALES: 78

TURBIEDAD (NTU): 15

COLOR (Esc. Pt-Co):0

pH: 7.9

To: 18°C

Fuente: VERTIENTE DEL CENSO

(AGUA CLARA)

TIEMPO DE EXPOSICIÓN HORAS	PARÁMETROS	TIPO DE RECIPIENTE	
		1	2
5	Temperatura °C CF/100 ml	23 0	23 0
5	Temperatura °C CF/100 ml	24 0	24 0
6	Temperatura °C CF/100 ml	24 0	24 0

OBSERVACIONES:

CONDICIONES DE LUMINOCIDAD:

NUBLADO A PARCIALMENTE NUBLADO TODO EL DÍA

## ANEXO No 2

### DESINFECCIÓN POR RADIACIÓN SOLAR

ENSAYO No 2

Fuente: SANTA ROSA DE PUNUNA

FECHA: 22.09.92

(AGUA CLARA)

HORA: 9h00

CF/100ml INICIALES: 84

TURBIEDAD (NTU): 0.2

COLOR (Esc. Pt-Co):0

To: 18°C

CONDICIONES DE LUMINOSIDAD:

TIEMPO DE EXPOSICIÓN HORAS	PARÁMETROS	TIPO DE RECIPIENTE	
		1	2
1	Temperatura °C	20	20
	Cf/100 ml	52	64
2	Temperatura °C	20	20
	Cf/100 ml	48	48
3	Temperatura °C	22	23
	Cf/100 ml	32	36
5	Temperatura °C	24.8	24
	Cf/100 ml	8	16

OBSERVACIONES:

PARCIALMENTE NUBLADO TODO EL DÍA

NUBLADO A LAS 9H00

SOLEADO HASTA LAS 13H00

NUBLADO DESDE LAS 14H00

LLUVIA DESDE LAS 16H40

## ANEXO No 3

### DESINFECCIÓN POR CALOR SOLAR

ENSAYO No 2

Fuente: VERTIENTE DEL CENSO

FECHA: 19.09.92

HORA: 10h30

CF/100ml INICIALES: 136

TURBIEDAD (NTU): 5

COLOR (Esc. Pt-Co):0

pH: 7.3

To: 18°C

TIEMPO DE EXPOSICIÓN HORAS	PARÁMETROS	TIPO DE RECIPIENTE		TIPO DE RECIPIENTE	
		Barro cocido	Barro Cocido	Aluminio	Aluminio
		6L	6L	6L	6L
		1	2	1	2
2	TEMPERATURA °C	25.5	25.5	28.5	28.5
	Cf/100 ml	132	180	156	152
4	TEMPERATURA °C	30	30	33	32.8
	Cf/100 ml	132	132	188	202
6	TEMPERATURA °C	33	33	34.5	35
	Cf/100 ml	180	176	156	88

OBSERVACIONES:

SOLEADO TODO EL DÍA

## ANEXO No 4

**TABLA COMPARATIVA DE LOS DISTINTOS DESINFECTANTES Y SU APLICABILIDAD**

	SODIS	Cl <sub>2</sub>	UV	F.L.A.	O <sub>3</sub>	ClO <sub>2</sub>	MINI	Br <sub>2</sub>	Ag	I <sub>2</sub>
<b>Efectividad</b>										
• Bacterias	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
• Virus	A	A	A	I	A	A	A	A	I	A
• Protozoos	B	B	B	A	I	I	A	B	B	I
• Helmintos	B	B	B	A	A	I	A	B	B	B
<b>Influencia del agua cruda en relación a</b>										
• pH	B	A	B	B	B	B	A	I	B	B
• Turbiedad	A	I	A	B	A	I	A	I	I	A
• Materia orgánica	I	B	B	B	B	B	I	B	B	B
Produce SPD	NO	SI	NO	NO	B	B	NO	SI	NO	NO
Mantiene Residual de protección	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI
Posible cambios sabores y olores	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO
Rango de uso Caudales	B	B-I-A	B-I-A	B-I	B-I-A	I-A	I-A	B-I	B	B-I
Costo de Capital (equipos)	B	B	B-I	I	I-A	I-A	A	B	B-I	B
Costo de operación	B	B	B-I	B	A	A	A	I	I	I-A
Capacidad del operador	B	B-I	B-I	B	A	A	A	B-I	B-I	B-I
Requerimientos de productos químicos	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	SI	SI	SI
Requerimientos de energía	NO	B	I	NO	A	A	A	B	B	B

A = Alto

I = Intermedio

B = Bajo

### Atributos de distintos equipos y dosificadores

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Sirve para corrientes de agua (canales, tubos sin presión)	SI	NO	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
Sirve para dosificar bajo presión (tuberías en carga)	NO	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Sirve para flujos intermitentes	NO	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI
Sirve para caudales: Bajos, Intermedios o Altos (B.I.A.)	B	B	I-A	B-I	I-A	B-I	B-I	B-I-A	B-I	B-I-A	I-A	I-A	B-I	B-I	B
Puede ser construido localmente por artesanos del lugar	SI	SI	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Disponibilidad de repuestos en el lugar o en comunidades cercanas	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Conocimiento del operador para mantenimiento y reparaciones: Bajo, Intermedio o Alto (B.I.A.)	B	B	I	B	I	B	B	B/I	B	A	A	A	I	I	B

1. Calentadores continuos (SODIS)
2. Calentadores por tanda (SODIS)
3. Dosificadores de gas (Cloro)
4. Dosificadores de solución (caja nivel constante; vaso/botella; tubo con orificio) (Hipoclorito de sodio, soluciones de Br<sub>2</sub>, Ag, etc)
5. Bombas dosificadoras (Hipoclorito de sodio, soluciones de Br<sub>2</sub>, Ag, etc)
6. Venturis (Hipoclorito de sodio, soluciones de Br<sub>2</sub>, Ag, etc)
7. Aparatos de Erosión (Hipoclorito de calcio)
8. Equipos de radiación UV
9. Filtro lento de arena

10. Equipos de Ozonización
11. Equipos de Dióxido de cloro
12. Minifiltración
13. Equipos electrolíticos (Ag)
14. MOGGOD
15. Filtros caseros

A = Alto

I = Intermedio

B = Bajo