# CAPÍTULO I

# INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha firmado en América Central acuerdos para mejorar, implementar y acreditar laboratorios, para evaluar plantas de tratamiento de agua, y mejorar la calidad de las fuentes; y para capacitar en inspecciones sanitarias, protección de fuentes y promoción de planes de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano. Este último punto es el más importante en lo que respecta a cualquier método de desinfección del agua potable, así que, nos marca la pauta sobre nuestro estudio y la responsabilidad que tenemos en las mejoras de cualquier sistema de desinfección (Solsona y Méndez, 2002).

Las enfermedades diarreicas que parecen ser tan antiguas como el ser humano tienen su vigencia y protagonismo en nuestra vida cotidiana, el "Reporte de Salud Mundial" de la OMS de 1999, ubican a la diarrea como la séptima causa de muerte en el mundo, y la primera causa de morbilidad en el ser humano, con cuatro mil millones de casos anuales. Se estima que en todo momento, casi la mitad de la población que habitan los países en desarrollo está sufriendo un episodio de diarrea (Solsona y Méndez, 2002)

La población más susceptible a enfermedades diarreicas es aquella que sufre de una deficiente nutrición, la inapropiada disposición de excretas, inadecuadas prácticas higiénicas, así como de factores económicos y una mala calidad del agua de bebida, Este

último punto es una responsabilidad de la ingeniería sanitaria y otras ciencias asociadas, así que la desinfección del agua de bebida es la clave para la solución del problema.

La diferencia que existe entre los países desarrollados y los en vías de desarrollo es que, en los primeros la desinfección está incorporada en un proceso ineludible, fijo y establecido. En esos países la ingeniería sanitaria, la química, la bioquímica y la toxicología evalúan las mejores capacidades, las mayores eficiencias y los menores costos. Además desde el punto de vista sanitario y toxicológico, ahondan las características y las relaciones que tienen los desinfectantes y los productos de la desinfección con la salud.

En los países en vías de desarrollo ocurre lo contrario, los tratamientos de potabilización sobre todo en áreas rurales son de mala operación y escaso mantenimiento. En 1995 la Organización Panamericana de la Salud realizó una encuesta en América Latina y comprobó que sólo el 41% de las aguas entregadas a la población recibían una adecuada desinfección. En estos países es importante el conocimiento de tecnologías simples, apropiadas y confiables con costos reducidos de operación y mantenimientos sencillos y económicos.

El objetivo principal de esta tesis es investigar la eficiencia y potencial aplicación de la radiación solar como desinfectante del agua potable. Como se mencionó anteriormente, en muchos lugares y en especial en comunidades rurales, una desinfección deficiente del agua potable puede producir enfermedades gastrointestinales severas. Sin

embargo, la implementación de un proceso de desinfección de bajo costo y simple como la radiación solar ayudarían a eliminar, o por lo menos a mitigar, este problema.

Esta tesis comienza con una breve descripción de las características relevantes del agua potable, así como de las propiedades, ventajas y desventajas de los desinfectantes químicos más comúnmente utilizados en el proceso de desinfección. De la misma manera, se describen desinfectantes menos tradicionales como la radiación ultravioleta (UV) y la radiación solar (Capítulo I). Con la finalidad de seleccionar un microorganismo indicador que permitiera evaluar la eficiencia de la radiación solar como desinfectante, en el Capítulo II se identifican los principales patógenos del agua potable y se elige un microorganismo adecuado para desarrollar la parte experimental de este trabajo (Capítulo III). La discusión y resultado de los experimentos realizados se presentan en el Capítulo IV, y por último, las conclusiones de esta tesis se encuentran en el Capítulo V.

## 1.1 Desinfección del agua potable

La operación que asegura protección contra el riesgo de infecciones de origen hídrico se denomina desinfección. Este es el tratamiento que debe aplicarse prioritariamente cuando el agua está contaminada con microorganismos patógenos, o cuando no se puede garantizar su potabilidad natural de forma permanente (CEPIS, 1999).

La desinfección es un proceso clave en cualquier sistema de tratamiento de agua. Por ello no se debe de considerar como un simple proceso, sino como parte importante y

vital del tratamiento. La calidad del agua potable es tan o más importante como la producción de la misma. Es muy importante que la selección de cualquier tecnología se tomen en cuenta condiciones tales como los recursos disponibles y la posibilidad de soporte técnico en los aspectos sociales, económicos y culturales de la comunidad (Acher, et al., 1997).

Un aspecto importante es que en muchos casos la importación de productos químicos de otros países o localidades acarrea demoras y discontinuidad en el proceso que pueden ser temporales o permanentes. Además la selección de la técnica y el sistema de desinfección debe tener en cuenta las características y contrastarlas con las características de la planta, el lugar y la comunidad, es decir las condiciones de la técnica de desinfección ligadas con las de la fuente, lugar, sistema, población y características culturales (Solsona y Méndez, 2002).

Es importante mencionar que, en la mayoría de los casos, el agua no va del grifo a la boca del consumidor. Es muy común que el agua dispuesta para uso domestico se deposite en tanques o bien sea acarreada desde grifos públicos o fuentes. Este almacenamiento y/o trasporte hace que la contaminación del agua sea frecuente. Por esta razón es necesario tomar medidas de seguridad para evitar y controlar su contaminación a través de un diseño adecuado del proceso de desinfección (Solsona y Méndez, 2002).

Otros aspectos importantes que deben considerarse para la generación de agua potable son: 1) asegurar una adecuada selección de la fuente que permita la entrada de agua

de mejor calidad a la planta de tratamiento, y 2) proporcionar una buena calidad del agua antes de que ésta entre en contacto con el desinfectante. Otros factores que determinan la eficiencia de la desinfección química del agua potable son la presencia de sólidos suspendidos, compuestos orgánicos e inorgánicos, el contenido de oxigeno disuelto, y de manera más importante el pH y la temperatura. En general una desinfección satisfactoria del agua depende de las características de la misma, de la concentración y tipo de desinfectante, así como del tiempo de contacto provisto (Acher, et al., 1997).

Independientemente de cual sea el desinfectante que se utilice es muy importante tomar en consideración que éste debe incorporarse de manera homogénea en toda la masa del agua. Esto se puede lograr a través de una mezcla adecuada. Sin embargo deben tomarse las precauciones necesarias para evitar la aplicación de dosis excesivas de desinfectantes que pudieran comprometer las condiciones estéticas de olor y sabor del agua potable. Por ejemplo, una dosis de 2 mg/l de cloro puede llegar a producir sabores y olores desagradables en el agua (Solsona y Méndez, 2002).

Un inconveniente importante de la desinfección química es la formación de subproductos (SPD). Casi todos los desinfectantes producen SPDs: el cloro ($Cl_2$) da lugar entre otros a los Trihalometanos, los haloacetatos, acetonitrilos halogenados y clorofenoles; el dióxido de cloro ($ClO_2$) produce más de cuarenta SPDs, en los que se cuentan los cloratos ($ClO_3^-$), cloritos ($ClO_2^-$) y los clorofenoles; El ozono ($O_3$) a su vez produce aldehídos, ácidos carboxílicos, bromatos, cianuros, bromoetanos, acetonitrilos bromados y

cetonas. El problema relacionado con muchos de los SPDs mencionados es que se ha comprobado su efecto cancerigeno en el ser humano.

Esto nos lleva a definir el "riesgo de la desinfección" y "el riesgo de la no-desinfección". El riesgo de enfermar con cáncer esta asociado a una ingesta durante periodos prolongados de un agua desinfectada y es un riesgo potencialmente bajo. El riesgo de enfermar o morir por otras enfermedades debido a consumo de agua contaminada que no esta desinfectada es, en cambio, mucho más alto. En el caso del cloro, se estima que el riesgo de morir por cáncer debido a la ingesta de agua desinfectada frente al riesgo de morir por alguna enfermedad de transmisión hídrica es de 1 en 1000. Es decir que una persona corre riesgo mil veces mayor de morir por una enfermedad diarreica, que morir por un cáncer asociado a la ingesta de aguas. Pero si estos datos de mortalidad son relevantes, mucho más son los relacionados con la posibilidad de enfermar. La morbilidad, que es el riesgo de enfermar, de diarrea es de 1 000.000 de veces mayor que el riesgo de enfermar por cáncer. Esto llevó a la OMS a establecer que "bajo ningún concepto debe comprometerse la desinfección del agua de consumo" (Solsona y Méndez, 2002).

Entre 1982 y 1995 la OMS realizó una serie de evaluaciones en la Región de América Latina y el Caribe para determinar las mayores causas de falla en los sistemas de desinfección, debido a que los más comunes son la desinfección con cloro, el dióxido de cloro y el ozono. De acuerdo a Solsona y Méndez (2002), los resultados de la encuesta se muestran en la Tabla 1.1.

| Problema | Causa |
|---|---|
| | |
| Mantenimiento deficiente | Equipos de calidad cuestionable. |
| | |
| Mal funcionamiento del equipo | Falta de motivación y compromiso político en la comunidad para respaldar en forma continua un plan de desinfección.<br>Falta de repuestos para los equipos.<br>Sistemas de desinfección mal proyectados y mal construidos. |
| | |
| Errores en el diseño y planeación | Falta de conocimiento e información sobre los riesgos de una desinfección ineficiente y sobre la importancia de la relación entre el agua y la salud.<br>Personal no capacitado para hacer una correcta operación, mantenimiento y reparaciones.<br>Falta de supervisión y monitoreo.<br>Requerimientos demasiado complejos y exigentes para la operación y el mantenimiento.<br>Fallas en la provisión de electricidad.<br>Deficiente tratamiento del agua previo a la desinfección. |
| | |
| Desabasto del agente desinfectante | Poca disponibilidad de desinfectantes en el mercado local. En ocasiones, esto se puede deber a escasez de recursos económicos. |

**Tabla 1.1** Las principales causas y problemas más comunes en un proyecto de desinfección.

La identificación de estas causas y su solución son importantes para implementar un sistema de desinfección exitoso.

A pesar de las críticas e inconvenientes que presentan, el cloro y sus derivados han sido responsables de una verdadera revolución sanitaria en las últimas décadas. Se estima que buena parte de la prolongación del promedio de vida que en el siglo XX ha disfrutado occidente, se debe a la introducción del cloro como desinfectante del agua.

A continuación se presenta una descripción de las características de los desinfectantes químicos mas utilizados para la desinfección de agua potable. En este esquema se menciona la eficiencia de los métodos de mejor funcionamiento en la desinfección.

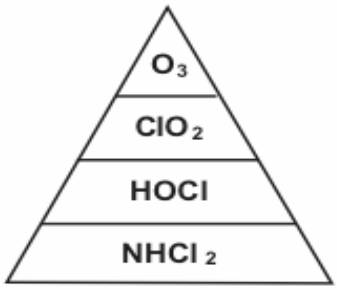


**Figura 1.1** Desinfectantes químicos ordenados de acuerdo a su potencial de oxidación.

## 1.2 Desinfección con cloro.

En todo el mundo el procedimiento de desinfección mas aplicado en los sistemas de abastecimiento de agua es el que se emplea con cloro y sus componentes derivados como agentes desinfectantes. Su extendida popularidad como desinfectante químico se debe a su fácil obtención, su razonable costo, y su relativamente alta capacidad oxidante. Por otro lado, debido a su buena estabilidad, el cloro se ha utilizado para proveer un efecto residual en las redes de distribución de agua potable para prevenir una subsecuente contaminación del agua tratada. Todo ello permite en forma bastante simple, asegurar la inocuidad del agua desde que se produce hasta el momento que se usa, lo que resulta muy beneficioso, tanto en sistemas pequeños como en grandes ciudades con redes de distribución extendidas.

Se entiende como cloro residual a la dosis de desinfectante que permanece en el agua tratada una vez que se ha satisfecho su demanda de cloro. Por lo tanto, el efecto residual del cloro consiste en adicionar una dosis controlada que resulte en exceso a la demanda y garantice la presencia de un agente sanitizante en toda la red de distribución. La dosis de cloro residual aceptable se define en las normas de calidad del agua que rigen a

cada país. Como referencia, la OMS considera que una concentración de 0.5 mg/l de cloro residual libre en el agua, combinada con un tiempo de contacto de 30 minutos, garantiza una desinfección satisfactoria. Enseguida, la Figura 1.2 muestra la formación de cloro residual en función de la cantidad de cloro introducido.

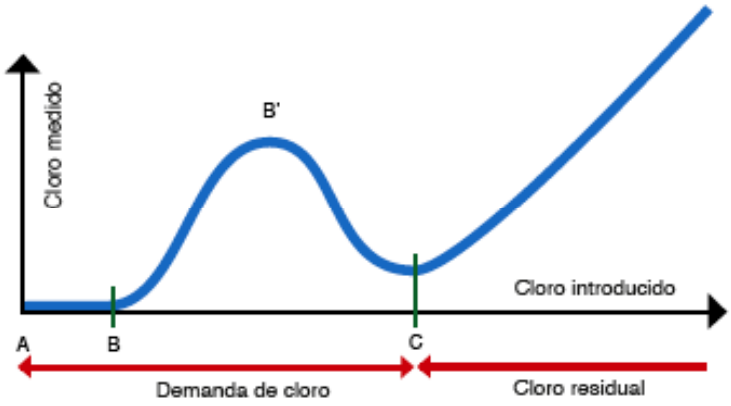


**Figura 1.2** Formación de cloro residual en función del cloro agregado y la correspondiente demanda del agua potable (CEPIS, 1999).

De la Figura 1.2 podemos identificar tres fases importantes que se presentan al agregar cloro al agua potable. En la primera de ellas, la fase AB, el cloro es introducido en el agua y es consumido en su totalidad por la materia orgánica presente en el agua. Hasta este momento el residual de cloro medido es igual a cero. Una vez satisfecha esta demanda inicial se presenta la fase BB´, en donde el cloro se combina con compuestos nitrogenados formando cloraminas. Se trata de productos orgánicos complejos, por lo general de fuerte olor, y poca capacidad microbicida. Al agregar mas cloro se presenta la fase B´C, en la cual la cantidad de cloro residual que se mide, va en descenso. En realidad el cloro introducido ha servido para destruir los compuestos formados durante la fase BB´. A partir del punto C,

el cloro introducido está finalmente disponible para cumplir su función de desinfectante residual.

En conclusión, los primeros miligramos de cloro introducidos no garantizan la existencia de un residual en el agua tratada. De hecho, antes de que está pueda garantizar realmente una acción eficaz, se deberá agregar una cantidad variable de desinfectante para que se produzcan todas las reacciones químicas secundarias. Esta cantidad se denomina "demanda de cloro".

### 1.2.1 Características químicas del cloro libre

Los productos de la familia del cloro disponibles en el mercado para realizar la desinfección del agua son: cloro gaseoso ($Cl_2$), cal clorada ($CaCl_2$), hipoclorito de sodio (NaClO), hipoclorito de calcio ($CaClO_2$). El cloro gaseoso es el de uso más común en la desinfección de agua potable a nivel municipal. La figura 1.3 muestra la manera usual de almacenar este tipo de desinfectante *in situ.*

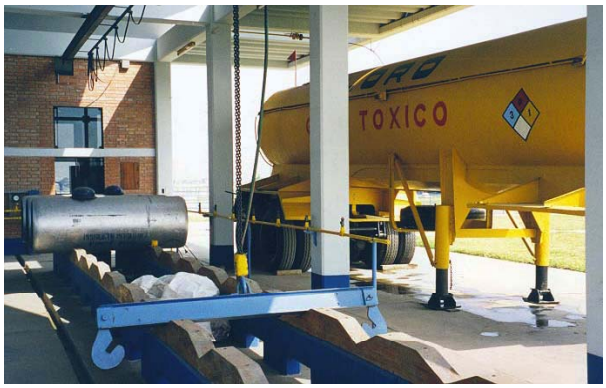


**Figura 1.3** Cilindros de una tonelada y tanques rodantes con cloro.
Tomado de Solsona y Méndez, (2002).

El cloro, en cualquiera de sus formas, se hidroliza al entrar en contacto con el agua y puede formar ácido hipocloroso (HOCl). En el caso de cloro gas ($Cl_2$), el ácido hipocloroso se forma de acuerdo a la siguiente reacción:

$$\mathbf{Cl_2 + H_2O \Rightarrow H^+ + Cl^- + HOCl} \qquad \mathbf{(1.1)}$$

En el caso del hipoclorito de sodio (NaOCl), la reacción que tiene lugar es:

$$\mathbf{NaOCl + H_2O \Rightarrow Na^+ + OH^- + HOCl} \qquad \mathbf{(1.2)}$$

En el caso del hipoclorito de calcio $Ca(OCl)_2$ y la porción activa de la cal clorada, la reacción es:

$$\mathbf{Ca(OCl)_2 + 2H_2O \Rightarrow Ca^{++} + 2OH^- + 2HOCl} \qquad \mathbf{(1.3)}$$

Durante el proceso químico de la desinfección con cloro, en presencia de amonio en el agua, se producen compuestos tales como cloraminas, dicloraminas y tricloraminas. De manera similar al cloro libre, las cloraminas actúan igualmente como agentes desinfectantes, aunque tienen una capacidad de oxidación considerablemente menor y por ello su eficiencia como desinfectantes es menor.

Del cloro libre, la especie con mayor capacidad germicida es el ácido hipocloroso (HOCl), el cual se disocia en iones hidrógenos ($H^+$) e hipoclorito ($OCl^-$) a pH mayores a 7.5 de acuerdo a la siguiente reacción.

$$\mathbf{HOCl \Rightarrow H^+ + OCl^-} \qquad \mathbf{(1.4)}$$

Ambas fracciones de la especie son microbicidas, HOCl y $OCl^-$, y actúan inhibiendo la actividad enzimática de los microorganismos produciendo su inactivación. Sin embargo, se ha demostrado que el ión hipoclorito ($OCl^-$) tiene mucho menor capacidad como desinfectante que el ácido hipocloroso (Driedger et al, 2000).

Es importante mencionar que tanto el ácido hipocloroso (HOCl) como el ión hipoclorito (OCl) existen de manera conjunta en el agua cuando el pH varía entre 6 y 9 (el rango usual para el agua natural y potable). Cuando el valor de pH de agua clorada es 7.5, el 50% de la concentración de cloro presente será ácido hipocloroso no disociado y el otro 50% será ión hipoclorito. Los diferentes porcentajes de HOCl y $OCl^-$ a diferentes valores de pH pueden verse en la figura 1.4.

Las diferentes concentraciones de las dos especies significan una considerable diferencia en la propiedad bactericida del cloro, ya que estos dos compuestos presentan diferentes propiedades germicidas. En realidad, la eficiencia del HOCl es por lo menos 80 veces mayor que la del $OCl^-$. Es por esto que se aconseja mantener un pH controlado menor a 8 en la desinfección de agua potable.

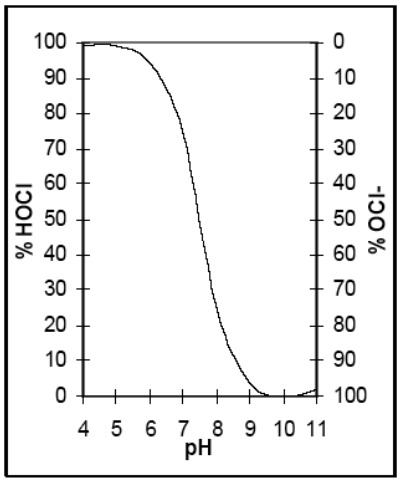


**Figura 1.4** Concentraciones relativas de ácido hipocloroso (HOCl) y ión hipoclorito ($OCl^-$) en función del pH.

Además de la forma que pueda tomar el cloro, la turbiedad es otro factor de peso en la desinfección. Una excesiva turbiedad puede consumir el cloro suministrado y por lo tanto reducir su efectividad como desinfectante, protegiendo a las bacterias y virus de su efecto oxidante.

En términos generales para obtener una desinfección óptima con cloro se recomienda tomar en cuenta las siguientes características (CEPIS, 1999):

| | |
|---|---|
| **Turbiedad** | **< 0,5 NTU** |
| **pH** | **< 8,0** |
| **Tiempo de retención** | **> 30 min** |
| **Cloro libre residual** | **> 0,5mg/l** |

**Tabla 1.2** Parámetros técnicos recomendados para una desinfección óptima con cloro libre.

### 1.2.2 Ventajas y desventajas de la desinfección con cloro libre

En términos generales las ventajas de la desinfección con cloro son:

- Tiene una acción germicida de espectro amplio.
- Muestran una buena persistencia en los sistemas de distribución de agua, pues presentan propiedades residuales que pueden medirse fácilmente y vigilarse en las redes después que el agua ha sido tratada.
- El equipo para la dosificación es sencillo, confiable y de bajo costo.
- El cloro y sus derivados se consiguen fácilmente.

En contraste las principales desventajas son las siguientes:

- Falta de capacitación para el manejo adecuado del desinfectante. En el caso de gas cloro, debe tenerse mucho cuidado por que el gas es toxico.
- La vigilancia y mantenimiento de los equipos resulta ser de mucho cuidado en los diferentes usos en la desinfección.
- Si no se lleva un control preciso de la dosificación del cloro, ésta puede generar sabores y olores desagradables.

## 1.3 Desinfección con ozono

El ozono ($O_3$) es un gas alótropo del oxígeno (la alotropía son las formas que puede presentar un elemento en la naturaleza en el mismo estado de agregación). A la temperatura y presión del ambiente el ozono es un gas inestable que se descompone rápidamente para volver a la molécula de oxígeno ($O_2$). Debido a esta inestabilidad, no se puede almacenar o envasar, sino que debe generarse *in situ* y usarse inmediatamente. Por lo general, la ozonización se utiliza cuando se requiere de un potencial de oxidación elevado, que permita la degradación de los compuestos orgánicos que dan color, sabor u olor desagradables al agua, o también cuando se desea inactivar microorganismos patógenos del agua. Esta condición convierte al ozono en un eficiente destructor de bacterias y la evidencia sugiere que es igual efectivo para atacar virus, esporas y quistes resistentes de bacterias y hongos. Sin embargo, cuando hay presencia de material orgánico, la reacción se hace más compleja y se acelera la descomposición del ozono.

A pesar de sus excelentes propiedades como desinfectante, su uso se ha restringido a ciudades grandes con fuentes de agua muy contaminada y se ha empleado poco en comunidades pequeñas. El inconveniente principal para las comunidades pequeñas ha sido el costo inicial y el de operación, así como las dificultades de operación y mantenimiento. Sin embargo, cuando las fuentes de agua accesibles están muy contaminadas (biológica y/o químicamente), la ozonización puede ser el método más recomendable para la oxidación de las sustancias orgánicas y desinfección primaria. Por supuesto, se deberá contar con un sistema de cloración secundario para dar un efecto residual al agua durante su distribución.

El método de desinfección por ozonización consiste en agregar cantidades suficientes de ozono lo más rápidamente posible, de manera que satisfaga la demanda y mantenga un residuo de ozono durante un tiempo suficiente para asegurar la inactivación o destrucción de los microorganismos y compuestos orgánicos de interés. La demanda de ozono en la mayoría de los sistemas de abastecimiento de agua suelen ser mayor a la del cloro, debido a su gran potencial de oxidación. Los procesos de desinfección por ozono normalmente tratan de mantener un residual mínimo de 0.4 a 0.5 mg/l después de 10-20 minutos de contacto con el agua.

### 1.3.1 Equipo Básico para la desinfección con ozono

Los sistemas de ozonización constan de cinco componentes básicos: 1) la unidad de preparación de gas, que puede ser tanto de aire como de oxígeno puro; 2) el generador de ozono, 3) la fuente de energía eléctrica, 4) el proceso de contacto y por último; 5) la unidad para la eliminación del gas sobrante. En la mayoría de los casos, tal como se ha mencionado, además de ozono se añade un desinfectante secundario para asegurar un residual duradero en el sistema de distribución. Para la desinfección secundaria se recomienda que la cloración sea inmediata a la ozonización. Asimismo se recomienda que la ozonización esté seguida de carbón activado para absorber aquellos compuestos orgánicos que pudieran volverse más biodegradables al ser hidrolizados por el desinfectante. De no ser removidos, estos compuestos promoverían el recrudecimiento biológico en los sistemas de distribución (Solsona y Méndez, 2002).

### 1.3.2 Subproductos de la desinfección con ozono

Al igual que el cloro, el ozono puede producir subproductos como los bromatos, el bromoformo, el ácido bromoacétido, los aldehidos, las cetonas y los ácidos carboxílicos. Entre ellos los aldehidos son probablemente los de mayor inquietud para la salud.

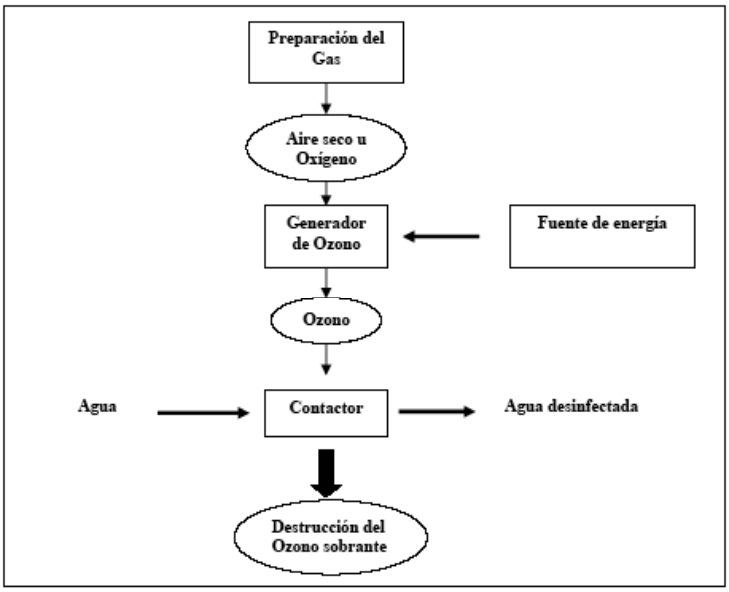


**Figura 1.5** Esquema básico del proceso de ozonización de agua potable.

### 1.3.3 Ventajas y desventajas de la desinfección con ozono

Una de las características principales del proceso de oxidación con ozono es que gran parte de éste generalmente será consumido por otras substancias que suelen estar presentes en el agua y habrá que satisfacer esa demanda antes de asegurar la desinfección.

Desde el punto de vista de la eficiencia biocida, el ozono es el desinfectante más potente que se utiliza en los suministros de agua. Los valores de *CT* (tiempo de contacto x concentración) requeridos para inactivar microorganismos patógenos con ozono son muchos más bajos que los del cloro libre o cualquier otro desinfectante. Además, la capacidad del ozono como desinfectante no es afectada de manera significativa por el pH en el intervalo usual 6.0-10.0 observado en el agua.

El ozono, a pesar de ser un excelente desinfectante primario, tiene como desventaja principal el no proporcionar un residual estable. Por lo tanto, habrá que añadir un desinfectante secundario para proporcionar ese residual y proteger el agua de una posible contaminación en el sistema de distribución.

Otra limitación importante del proceso de ozonización es que la vida media del ozono disuelto en el agua es relativamente corta (30 minutos) y que éste reacciona además con sustancias orgánicas para producir derivados de peso molecular inferior, que son más biodegradables que sus precursores como ya se mencionó.

**1.4 Desinfección con dióxido de cloro.**

El dióxido de cloro es un gas de color verde amarillento sumamente soluble en agua que puede alcanzar concentraciones de hasta 2% en solución. Además de servir como desinfectante químico, el dióxido de cloro puede mejorar la calidad del agua potable neutralizando olores, removiendo color y oxidando hierro y manganeso. Sin embargo, no

puede comprimirse ni distribuirse en cilindros como el cloro gaseoso ni puede transportarse debido a su inestabilidad. El producto por lo tanto, debe generarse *in situ* mediante el uso de equipos especiales.

El dióxido de cloro comúnmente se genera mediante dos mecanismos: 1) la reacción de clorito de sodio ($NaClO_2$) con cloro gaseoso ($Cl_2$), ó 2) mediante la reacción de clorito de sodio con hipoclorito de sodio (NaOCl) y ácido sulfúrico ($H_2SO_4$)

$$\mathbf{2NaClO_2 + Cl_2 \Rightarrow 2ClO_2 + 2NaCl} \qquad \mathbf{(1.5)}$$

$$\mathbf{2NaClO_2 + NaOCl + H_2SO_4 \Rightarrow 2ClO_2 + NaCl + Na_2SO_4 + H_2O} \qquad \mathbf{(1.6)}$$

El dióxido de cloro ($ClO_2$) es un desinfectante cuya capacidad biocida generalmente sobrepasa a la del cloro y sus derivados. Debido a sus cualidades oxidantes selectivas, su aplicación es una alternativa a ser considerada donde además de la desinfección se requiere mejorar la calidad organoléptica del agua. Tiene un gran efecto en el control del sabor y el olor, así como para destruir sustancias orgánicas que proporcionan color o que son precursoras de trihalometanos (THM). Por ello, se aplica especialmente cuando las aguas crudas contienen altas concentraciones de precursores, que con la cloración tradicional darían lugar a la formación de subproductos de la desinfección (SPD). A pesar de ello, su uso como desinfectante en plantas de tratamiento se ve limitado a causa de su relativo costo elevado de producción.

### 1.4.1 Subproductos de la desinfección con dióxido de cloro

Mientras los desinfectantes que contienen cloro reaccionan con diversas sustancias mediante la oxidación y sustitución electrofílica, el dióxido de cloro sólo reacciona mediante la oxidación. Esta es la razón por la cual el dióxido de cloro pede disminuir la formación de THMs en el agua tratada. Si eventualmente se producen niveles considerables de THMs en las aguas tratadas con dióxido de cloro, esto a menudo se debe a problemas en los generadores del desinfectante debido a un exceso en el suministro de cloro, sustancia que participa en la formación de los THMs.

De cualquier modo, no se puede negar la existencia de SPDs. Los productos de la reacción de dióxido de cloro con material orgánico en el agua incluyen clorofenoles y los ácidos maleicos, fumáricos y oxálicos. Un estudio de los subproductos de la reacción del dióxido de cloro en un tratamiento piloto revelo más de 40 SPDs, aunque su toxicidad en la mayor parte es desconocida. Durante la oxidación de la materia orgánica, el dióxido de cloro se reduce a ión clorito ($ClO_2^-$). Es precisamente el clorito y también los cloratos ($ClO_3^-$) los más importantes SPDs producidos con el uso de este desinfectante.

### 1.4.2 Ventajas y desventajas de la desinfección con dióxido de cloro

Estrictamente como desinfectante, el dióxido de cloro presenta las siguientes ventajas:

- Tiene buena solubilidad.

- No hay corrosión en altas concentraciones, lo que reduce los costos de mantenimiento.
- No reacciona con amoniaco o sales de amonio.

Las desventajas de la desinfección con dióxido de cloro son las siguientes:

- Compleja producción.
- Formación de subproductos (clorito y clorato).
- Debe producirse en el lugar en donde se va a utilizar.
- Para su operación y mantenimiento requiere mano de obra capacitada.

## 1.5 Desinfección por radiación ultravioleta (UV)

Las aplicaciones prácticas de la radiación ultravioleta comenzaron en 1901 cuando se consiguió producir esta luz artificialmente. Esta técnica se consideró para la desinfección del agua potable cuando se comprobó que el cuarzo era uno de los pocos materiales casi totalmente transparentes a la radiación ultravioleta, lo que permitió la envoltura protectora de las lámparas UV. Los primeros intentos experimentales se llevaron en Marsella, Francia en 1910. Sin embargo, la popularidad del cloro y sus derivados, asociados a su bajo costo de aplicación, hicieron que se retardara la producción de equipos hasta la década de 1950 y más aún hasta la de 1970 en que las lámparas comienzan a ser confiables y de vida prolongada (Solsona y Méndez, 2002).

Una ventaja importante de la desinfección con radiación UV es la nula generación de SPDs. Sin embargo, esta ventaja se ve contrarrestada con la incapacidad del desinfectante para proporcionar un residual para hacer frente a eventuales contaminaciones en las redes de distribución o en las viviendas (Solsona y Méndez, 2002).

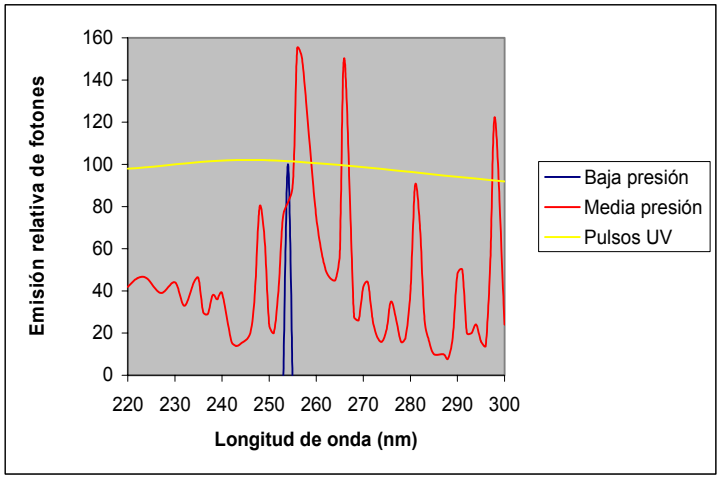


**Figura 1.6** Espectros de emisión de radiación UV de los 3 tipos de lámparas comúnmente utilizados para desinfección de agua (Corona Vasquez, 2004).

La figura 1.6 muestra el rango en que la luz ultravioleta tiene su máximo poder desinfectante, el cual se encuentra a una longitud de onda entre los 250 y 260 nm.

Los parámetros más importantes de la radiación UV relacionados con la desinfección del agua son:

1.- *Longitud de onda:* El rango germicida esta entre 240 y 280 nanómetros, obteniendo la máxima eficiencia desinfectante a 254 nm. Estos límites se encuentran dentro

de los rangos denominados UV– C (100-280 nm.), que se diferencian del UV – A (315-400 nm) y del UV B (280-315 nm). El significado de estos rangos se explica en la Figura 1.7.

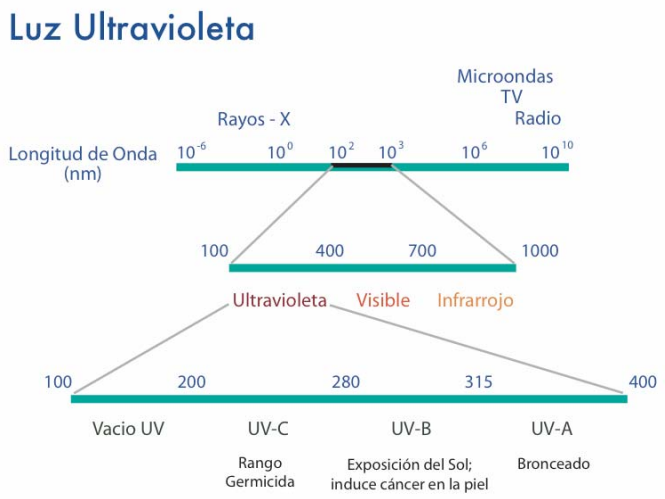


**Figura 1.7** Longitud de onda de la radiación ultravioleta.

2.- *Calidad del agua:* La temperatura, sólidos suspendidos, turbiedad y color del agua pueden afectar el proceso de desinfección con luz ultravioleta disminuyendo la dosis efectiva. Los sólidos suspendidos deben tener una concentración inferior a 10 mg/l y la turbiedad no debe ser mayor a 5 UTN (unidades de turbiedad nefilométricas),

3.- *Intensidad de la radiación:* A menor distancia del agua de la emisión de los rayos UV, mayor será la intensidad de los mismos. Por lo tanto, la desinfección será más eficiente. Así que, una regla general dice que no debe de haber más de 75 milimetros de profundidad de agua para asegurar que cada porción de la misma sea alcanzada por lo rayos adecuadamente.

4.- *Tipo de microorganismo:* Las dosis de luz ultravioleta requeridas para inactivar microorganismos patógenos comunes al agua potable se indican en la Tabla 1.3.

| BACTERIAS | ENERGÍA $\mu W/cm^2$ | OTROS ORGANISMOS | ENERGÍA $\mu W/cm^2$. |
|---|---|---|---|
| *Bacillus anthracis* | 8,700 | | |
| *S. enteritidis* | 7,600 | LEVADURA | |
| *B. magatherium sp. (veg)* | 2,500 | | |
| *B. peratyphosus* | 6,100 | *Saccharomyces ellipsoideus* | 13,200 |
| *B. subtilis* | 11,000 | *Saccharomyces sp.* | 1,600 |
| *Clostridium tetani* | 22,000 | *Saccharomyces cerevisiae* | 13,200 |
| *Corynebacterium diphtheriae* | 6,500 | *Levadura para cerveza* | 660 |
| *Eberthella typosa* | 4,100 | *Levadura para panaderia* | 800 |
| *Escherichia coli* | 6,600 | *Levadura para reposteria* | 13,200 |
| *Micrococcus candidus* | 12,300 | | |
| *Mycobacterium tuberculosis* | 10,000 | ESPORAS | |
| *Neisseria catarrhalis* | 8,500 | | |
| *Phytomonas tumefaciens* | 500 | *B. subtilis esporas* | 22,000 |
| *Proteus vulgaris* | 6,600 | *B. magatherium sp. (esporas)* | 5,200 |
| *Pseudomonas aeryginosa* | 10,500 | *Penicillium roqueforti* | 26,400 |
| *Pseudomonas fluorescens* | 6,600 | *Penicillium expansum* | 22,000 |
| *S. typhimurium* | 15,200 | *Mucor racemosus A* | 35,200 |
| *Salmonella* | 10,000 | *Mucor racemosus B* | 5,200 |
| *Sarcinahutea* | 26,400 | *Oospora lactis* | 1,100 |
| *Serratiamarcescens* | 6,160 | | |
| *Dysentry bacilli* | 4,200 | VIRUS | |
| *Shigella paradysenteriae* | 3,400 | | |
| *Spirillum rubrum* | 6,160 | *Bacteriophage (E. coli)* | 6,600 |
| *Staphylococcus alous* | 5,720 | *Virus de la influencia* | 6,600 |
| *Staphylococcus aureus* | 6,600 | *Virus de la hepatitis* | 8,000 |
| *Streptoccus hemolyticus* | 5,500 | *Poliovirus (Poliomyelitis)* | 1,000 |
| *Streptoccus lactis* | 8,800 | *Rotavirus* | 24,000 |
| *Streptoccus viridans* | 3,800 | | |
| *Vibrio cholerae* | 6,500 | ALGAS | |
| | | | |
| | | *chlorella vulgaris* | 2,000 |

**Tabla 1.3** Radiación de energía UV necesaria para destruir hasta en un 99.99% de los microorganismos patógenos del agua (Solsona y Méndez, 2002).

El procedimiento de desinfección consiste en poner en contacto el flujo de agua con una lámpara ultravioleta, de tal manera que la radiación actué directamente sobre los microorganismos.

El mecanismo de desinfección tradicionalmente atribuido a la radiación UV se basa en un fenómeno físico por el cual las ondas cortas de la radiación ultravioleta inciden sobre

el material genético (ácido desoxirribonucleíco, ADN) de los microorganismos, induciendo cambios que terminan por inhibir su reproducción, sin producir cambios físicos o químicos notables en el agua tratada.

En otras palabras, se cree que la inactivación por luz ultravioleta se produce mediante la absorción directa de la energía ultravioleta por el microorganismo y una reacción fotoquímica intracelular resultante que cambia la estructura bioquímica de las moléculas que son esenciales para la supervivencia del microorganismo.

### 1.5.1 Subproductos de la desinfección con radiación ultravioleta (UV)

No se conoce que haya efectos directos adversos sobre la salud de los consumidores de agua desinfectada con luz ultravioleta. Durante el proceso de desinfección con UV no se le agrega ninguna sustancia al agua, por lo tanto no hay riesgos de formación de SPDs y la luz ultravioleta no altera el sabor ni el olor del agua tratada.

### 1.5.2 Ventajas y desventajas de la desinfección con UV

Las principales ventajas de la desinfección con luz ultravioleta son la sencillez de operación y mantenimiento. Asimismo, el tiempo de exposición requerido es muy corto en comparación con los tiempos de contacto necesarios para los desinfectantes químicos convencionales. Por esta razón no se requiere de tanques de contacto demasiado complejos.

También es una ventaja su eficacia para aniquilar una gran variedad de microorganismos y el no contar con partes móviles que se desgasten.

La más notoria desventaja es la notable reducción de la eficiencia cuando aumenta la turbiedad o el color del agua, debido a que los microorganismos se pueden proteger de los efectos de la luz ultravioleta en las partículas en suspensión. Como ya se ha mencionado, otra desventaja de la desinfección con radiación UV es que no proporciona residuales. Esto quiere decir que después de la desinfección por este sistema hay que utilizar un desinfectante químico secundario para garantizar la seguridad microbiológica del agua durante su trayecto en la red de distribución y aún para cuando se almacena en las viviendas.

### 1.6 Desinfección Solar

Uno de los métodos de desinfección más simples y menos costosos para suministrar agua de calidad aceptable para el consumo humano es la radiación solar. Este método es ideal cuando las condiciones económicas y socioculturales de la comunidad impiden la sostenibilidad de otras alternativas de tratamiento y desinfección como la filtración o el uso de cloro, esto debido, a que la radiación solar es una técnica que ha demostrado potencial para la inactivación y destrucción de bacterias patógenas en el agua. La desinfección solar según González (2002) es “un proceso térmico y fotoquímico que consiste en elevar la temperatura del agua por un espacio suficiente de tiempo en contenedores acondicionados para lograr la absorción de calor proveniente de la radiación solar”. En este enunciado, el

autor se refiere exclusivamente a la inactivación de bacterias por calentamiento, y por consiguiente, visualiza la desinfección solar como un proceso similar a la desinfección por ebullición.

Para llevar a cabo la desinfección solar los procesos son muy sencillos. Estos consisten en la utilización de contenedores que pueden estar hechos de diferentes materiales que conduzcan y absorban el calor. Por ello estos equipos son en su mayoría de color negro, ya que éste absorbe mucho mejor el calor que otros colores claros (González, 2002).

A pesar de la sencillez del método, la desinfección solar no ha alcanzado popularidad extendida. La razón es que hay demasiadas variables que condicionan su eficacia y la eventual seguridad del agua tratada. Algunas de estas características son: la latitud y altitud geográfica, la época del año, el número de horas de exposición, la hora del día, la temperatura, y otras condiciones climáticas. Además, otros factores tales como el tipo, volumen y material de los envases que contienen el agua, así como la turbiedad y color del agua pueden delimitar la eficacia de la desinfección solar.

La OMS considera este método como una opción válida, pero sólo como un método menor y experimental. Aún así en áreas donde no hay otro medio disponible para desinfectar el agua, su utilización puede mejorar considerablemente la calidad bacteriológica de la misma (Solsona y Méndez, 2002).

Algunas de las tecnologías que se han utilizado para llevar a cabo la desinfección solar requieren el uso de equipos como el calentador solar de producción continua, la cocina solar, el concentrador solar y algunos destiladores. Todos estos equipos son sencillos, económicos y fáciles de operar, y serán descritos en detalle más adelante (Solsona y Méndez, 2002).

### 1.6.1 Procedimientos de la Desinfección Solar

La Figura 1.8 muestra las longitudes de onda de la radiación solar que penetra y se difunde a través de la atmósfera terrestre. La radiación UV (100-400 nm), la cual puede ser biológicamente perjudicial, es absorbida en su mayoría por la capa de ozono estratosférica y la longitud de onda mínima registrada siempre en el nivel del mar es de 284 nm. Esta radiación UV que alcanza la superficie de la tierra con longitudes de onda entre 284 y 400 nm se denomina UV-A y UV-B y representa menos del 3% de la radiación solar total sin tener propiedades germicidas.

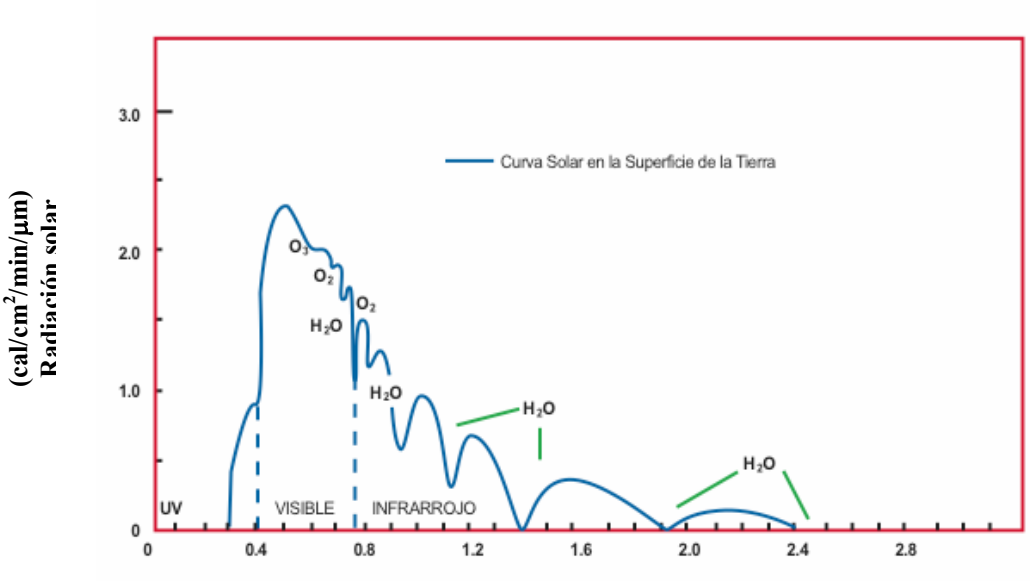


**Figura 1.8** Longitudes de onda de la radiación solar medida en la superficie terrestre (Acher, et al., 1997).

Se argumenta que la porción ultravioleta que acompaña a la porción visible cuando se expone agua a la luz del sol, sería la responsable de la acción bactericida. Pero lo cierto es que la porción realmente bactericida del componente ultravioleta, que corresponde al rango del UV-C (100-280 nm), es la que menos está presente en la radiación solar, y aún suponiendo que fuera suficiente para tener algún poder de desinfección, se ha comprobado científicamente que la mayoría de los materiales, incluso los transparentes a la luz solar, como el vidrio y el plástico son casi totalmente opacos a la radiación ultravioleta (Acher, et al., 1997).

El resultado de este simple análisis es que si se expone agua a una radiación escasa y además se interpone un filtro prácticamente opaco a la misma, entonces la capacidad desinfectante de esa radiación es prácticamente nula o, en el mejor de los casos, despreciable.

Las altas temperaturas pueden producir efectos perjudiciales a los microorganismos presentes en el agua. Uno de estos efectos es la desnaturalización de las proteínas, la cual altera la estructura, composición y funcionamiento de la pared celular de los microorganismos presentes en el agua y puede, eventualmente, comprometer su viabilidad. Salvo algunas excepciones, puede afirmarse que en general la mayoría de las bacterias mueren al ser expuestas a temperaturas en el rango de 40 y 100 ºC, mientras que las algas, protozoarios, y hongos, lo hacen entre los 40 y los 60 ºC.

Para el caso del agua se ha tratado de determinar la relación óptima entre el tiempo y la temperatura para destruir los gérmenes patógenos. Si bien esto no es exacto, se ha tomado como regla que, para una agua clara con turbiedad menor de 5 unidades de turbiedad nefilométricas (UTN), se puede asegurar un razonable nivel de seguridad en la desinfección con cualquiera de las siguientes relaciones: 1) 65 ºC durante 30 minutos ó 2) 75ºC durante 15 minutos. Desde un punto de vista práctico estas condiciones se aseguran en zonas soleadas con exposiciones de 4 a 5 horas en el periodo de máxima radiación. Usualmente este periodo se presenta entre las 11 hrs. y las 16 hrs. del día.

### 1.6.2 Subproductos de la Desinfección solar

El conocimiento actual de la desinfección solar y los estudios que se han realizado hasta el presente no reportan la presencia de subproductos de la desinfección. Esto es una gran ventaja de la desinfección solar ya que en la desinfección química la presencia de los SPDs, hace que se corra un riesgo en el proceso de desinfección. En comparación con la

desinfección UV, la radiación solar tampoco produce SPDs, y esto hace que sea una buena opción de desinfección al no incrementar los riesgos por subproductos de la desinfección.

### 1.6.3 Equipos para la desinfección solar

Se han desarrollado diferentes equipos para la desinfección con radiación solar y a continuación se presenta una descripción de los más comunes.

#### *1.6.3.1 Calentadores Solares*

El calentador solar comercial que se utiliza para desinfectar agua está compuesto por un colector que es simplemente una caja con marco de aluminio y cubierta de vidrio tal como se muestra en las Figuras 1.9 y 1.10. El colector contiene tubos de cobre, pintados de negro, soldados a dos tubos cabezales y que almacenan el agua en proceso de calentamiento. Dicho colector esta conectado por medio de tubos del mismo material, a un tanque termo de plástico y fibra de vidrio, aislado con espuma de poliuretano para almacenamiento del efluente tratado.

El principio de funcionamiento de estos sistemas es conocido como circuito convectivo o calentador solar pasivo, donde el calor de la radiación solar es absorbido por los tubos negros, lo que incrementa la temperatura del agua dentro del colector y produce una consecuente disminución de la densidad de ésta. En estas condiciones, la columna de agua fría en la tubería de retorno al colector ya no queda equilibrada por la columna de

agua caliente menos densa, por lo que la gravedad origina que la primera baje y desplace a la última hacia el tanque que está más arriba. Esta circulación natural, conocida como termosifón, continúa mientras exista suficiente calor para aumentar la temperatura del agua y la fuerza de empuje resultante pueda vencer la caída de presión en el sistema. El alcance de la desinfección en un calentador solar está ligado directamente a la temperatura que pueda alcanzar el agua. Dado que la máxima temperatura se alcanza, en promedio, entre las 14:30 hrs. y las 15:30 hrs, se recomienda evitar drenar el tanque antes de esa hora para aumentar así el tiempo de residencia del agua en el equipo.

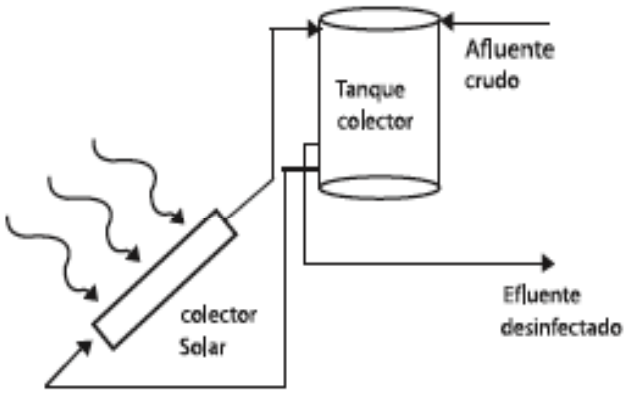


**Figura 1.9** Esquema de un termosifón para calentamiento de agua (Solsona y Méndez, 2002).

Los equipos convencionales familiares pueden producir unos 15 litros - y los equipos mayores hasta 1 $m^3$ de agua - después de 3 a 4 horas de operación al mediodía. Existen en el mercado calentadores más sofisticados con colectores de doble cubierta de vidrio y tubos aleteados de cobre con superficies selectivas para captar mayor cantidad de energía solar y convertirla en calor útil. Algunos llegan a alcanzar temperaturas de más de

90ºC e incluso pueden vaporizar el agua. No obstante, es necesario evaluar si las condiciones climatológicas del lugar justifican la inversión, de otra manera pueden utilizarse equipos menos eficientes pero también menos costosos.

**Figura 1.10** Calentador solar (Solsona y Méndez, 2002).

### *1.6.3.2 Concentradores Solares*

Los concentradores solares son un tipo de calentador solar que funciona como una lente cóncava que recibe los rayos del sol y los concentra en un punto. En este punto de incidencia se coloca la olla o recipiente con agua que se desea desinfectar. El diámetro típico de estos calentadores es de 0.80 m y pueden estar hechos de cartón recubierto de papel aluminio o de otro materiales.

Este tipo de cocinas genera temperaturas que pueden llegar a los 350 ºC, lo que permite el rápido calentamiento del agua. Esto puede permitir la desinfección por ebullición directa (Solsona y Méndez, 2002).

**Figura 1.11** Concentrador solar (Solsona y Méndez, 2002).

En la figura podemos observar la lámina cóncava que es la responsable de recibir los rayos de luz solar y transmitirlos a la olla. Ésta se encuentra sostenida sobre esta lente y es calentada para desinfectar el agua que la contiene.

*1.6.3.3 Cocinas Solares*

Las cocinas solares son muy sencillas de elaborar. Éstas consisten en un par de cajas que pueden ser de cartón o madera, una dentro de la otra, que sirven para atrapar el calor del sol y utilizarlo, en este caso, para calentar el agua. El principio consiste en aprovechar

el calor que llega del sol por radiación y atraparlo en el interior de la caja pequeña como se muestra en la Figura 1.12.

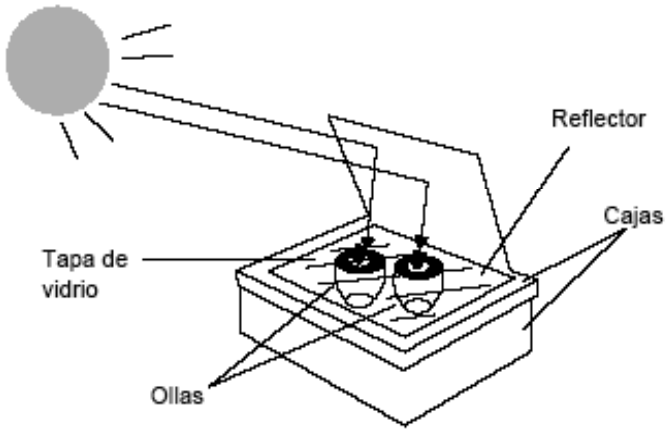


**Figura 1.12** Esquema de una cocina solar (Solsona y Méndez, 2002).

Este calor es transferido por conducción a través de las ollas de metal hacía el agua contenida. Es conveniente utilizar un reflector que ayude a dirigir más los rayos solares hacía dentro de la caja para mantener el calor. El uso de los reflectores disminuye aproximadamente en un 35% el tiempo del proceso.

**Figura 1.13** Cocina solar (Solsona y Méndez, 2002).

El espacio libre entre las dos cajas se rellena con un material aislante. Finalmente, se recomienda que las ollas se pinten de negro y se han de preferencia metálicas.

*1.6.3.4 Destiladores Solares*

Otro equipo que aplica la energía térmica es el destilador solar. Estos equipos se utilizan para la producción de agua potable a partir de agua de mar o de agua dulce con algún problema de contaminación y también sirven como sistemas de desinfección del agua. El principio de operación mediante energía solar es el mismo que utiliza la naturaleza en el ciclo hidrológico: se evapora el agua cruda del embalse y se condensa y precipita en otra parte generando así agua purificada.

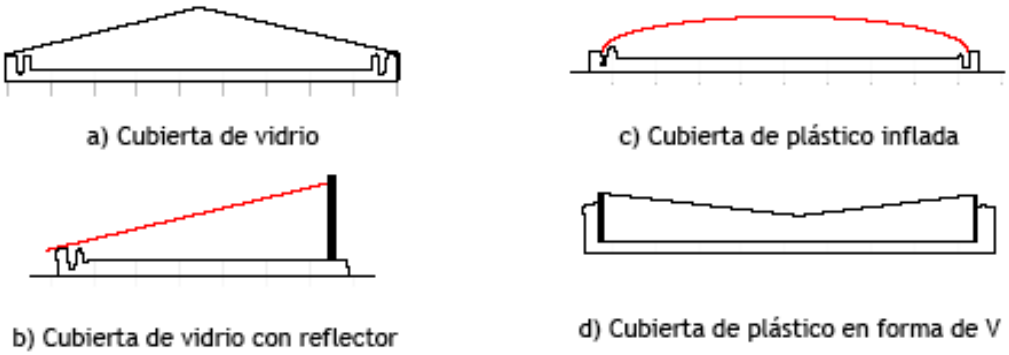


**Figura 1.14** Diagramas esquemáticos de diseño de destiladores solares simples (Solsona y Méndez, 2002).

En los destiladores solares más simples, el colector solar consiste en una charola horizontal de color negro que contiene el agua que se quiere destilar (a la que se le denomina "destilando"). Para evitar pérdidas indeseables de calor, es necesario que la charola esté aislada térmicamente por la parte inferior. El calentamiento del destilando produce evaporación y las sales minerales quedan retenidas en la charola. El destilador requiere que la charola tenga un color oscuro. La radiación visible e infrarroja es absorbida por cualquier superficie de color oscuro, de preferencia negro mate. El acabado mate de la charola se usa para lograr una mejor absorción y evitar pérdidas por reflexión.

*1.6.3.5 Proceso combinado de precalentamiento y destilación solar*

Este dispositivo fue propuesto por la Secretaria de Salud en México y está formado por un depósito de alimentación de agua, un termosifón, y un condensador. Resulta útil en lugares templados donde la temperatura no es suficiente para llevar a cabo el proceso de condensación, entonces el termosifón calienta el agua antes de que pase al condensador.

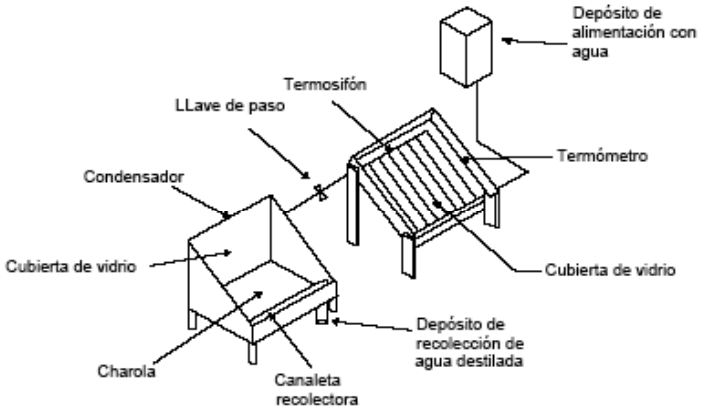


**Figura 1.15** Dispositivo combinado de termosifón y destilador solar (Solsona y Méndez, 2002).