

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES SOBRE EL CLORO

1.1 Reacciones del cloro en el agua.

El cloro en el agua es un agente químico muy activo. Si una pequeña cantidad se agrega al agua, reaccionará con las sustancias disueltas o suspendidas en ella. Por ejemplo, el cloro reacciona rápidamente con el ácido sulfhídrico, también con el manganeso, el fierro y los nitritos. Si se agrega la cantidad suficiente de cloro para que reaccione con estos compuestos, llamados compuestos reductores, entonces, un poco más de cloro que se agregue, reaccionará con cualquier sustancia orgánica presente, para producir compuestos orgánicos de cloro, los cuales tienen poca o ninguna acción desinfectante y pueden causar sabores y olores. Si se agrega cloro en cantidad suficiente para que reaccione con todas las sustancias reductoras, la materia orgánica y el amoníaco, un poco más de cloro que se agregue quedará como cloro residual libre, disponible, el cual es un agente desinfectante muy activo. En la figura No. 1 aparece una representación gráfica típica de las reacciones del cloro en el agua, que se conoce como “curva de demanda de cloro”.

La cantidad de sustancias reductoras, materia orgánica y amoníaco, varía para cada agua y cambia también con el tiempo, en el mismo abastecimiento de agua. Constantemente, también varía la cantidad de cloro que debe agregarse para su desinfección. La cantidad de cloro que consumen las sustancias reductoras y la materia orgánica se conoce como demanda de cloro. Cuantitativamente se define la demanda de cloro como la cantidad que se agrega, menos la cantidad que hay después del periodo de reacción seleccionado, generalmente de diez minutos, según se mida con la prueba de la ortotolidina y otros métodos más modernos. La cantidad de cloro que permanece después del periodo de reacción se define como cloro residual y se expresa en miligramos por litro (mg/L) o en partes por millón (ppm). El cloro residual puede existir como compuestos clorados de materia orgánica y amoníaco, en cuyo caso se conoce como “cloro residual combinado”; o puede estar al mismo tiempo combinado y como “cloro residual libre” y en este caso se conoce como “cloro residual total”. En consecuencia, “cloro suficiente” es

la cantidad requerida para producir un residuo deseado, ya sea combinado, libre o total, después de un período de contacto definido.

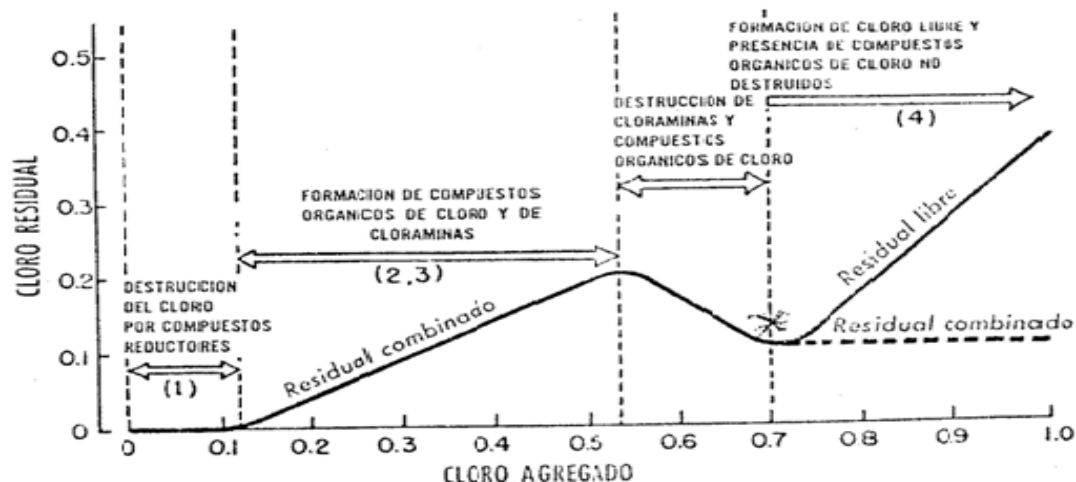


Fig.1.1.- Reacciones del Cloro en el Agua. [3,9]

El gas cloro se disuelve en agua de la siguiente manera:

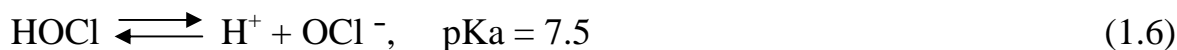


Siendo K_H la constante de disolución.

El cloro (ac) reacciona con agua, un átomo es oxidado a $\text{Cl}^{(+)}$ y el otro es reducido a $\text{Cl}^{(-)}$, esto es:



El ácido clorhídrico formado se disocia completamente bajo condiciones de solución acuosa diluida. El ácido hipocloroso, por otro lado, es un ácido relativamente débil:



En las dos últimas ecuaciones se deduce que la cantidad relativa de las diferentes especies oxidadas de cloro es una función del pH.

A partir de los valores de pKa a 25° C, se puede demostrar que a un pH de 7.5 las actividades del HOCl y del OCl⁻ son iguales. A valores de pH menores de 7.5 predomina el HOCl, mientras que arriba de 7.5 es predominante la especie OCl⁻. Esto es de interés, debido a que la habilidad desinfectante del HOCl es considerablemente mayor que la del OCl⁻. El HOCl es de 80 a 100 veces más efectivo para *E. Coli* que el ión OCl⁻. El Cl₂ (ac) no es importante arriba de un pH de 2. En el rango de p -H de las aguas naturales (6 a 9) las cantidades relativas de HOCl y OCl⁻ son sensibles al pH, esto puede ser un factor crítico para lograr el grado de desinfección deseado.

La forma en que el cloro se adiciona al agua afecta en alguna forma las probabilidades químicas de esta última. La adición de cloro gaseoso al agua bajará su alcalinidad debido a la producción de ácido fuerte y HOCl por la reacción de la ecuación (1.5). Sin embargo, si el cloro es dosificado como sal de ácido hipocloroso



Y



habrá un incremento en alcalinidad cuando reaccione con el H₂O.

El uso de hipoclorito de calcio incrementa tanto la alcalinidad como la dureza total (Ca⁺²) del agua:



Si se adiciona una cantidad conocida de cualquiera de las formas de cloro y después de un intervalo de tiempo (tiempo de contacto) se analiza el agua clorada (cloro residual), se puede encontrar menos cloro presente que el

adicionado. Entonces se dice que el agua tiene una “demanda de cloro” después de un cierto tiempo de contacto, es decir:

$$\text{Demanda de cloro} = \text{dosis de cloro} - \text{cloro residual} \quad (1.11)$$

Por lo que, como ya se mencionó, la demanda de cloro es el resultado de una variedad de reacciones en las cuales el cloro se consume por varios constituyentes del agua y por descomposición.

En la figura 1.2 se muestra la influencia del pH y la temperatura sobre la reacción (1.6).

La suma del HOCl y del OCl⁻ se llama cloro residual libre y es el desinfectante primario. HOCl es el desinfectante más efectivo. Como lo indica la reacción (1.5) se produce por adición de Cl₂ al agua, con una reducción de pH la cual limita la conversión a OCl⁻.

El cloro gaseoso puede licuarse por compresión y almacenarse en recipientes compactos. Debido a que puede regasificarse fácilmente y a su solubilidad de aproximadamente 700 mg/L en agua a pH y temperaturas normales, es la forma de cloro usualmente preferida en tratamiento, sin embargo, debido a su peligrosidad, algunas veces se recomienda el uso de hipocloritos, sobre todo cerca de las poblaciones.

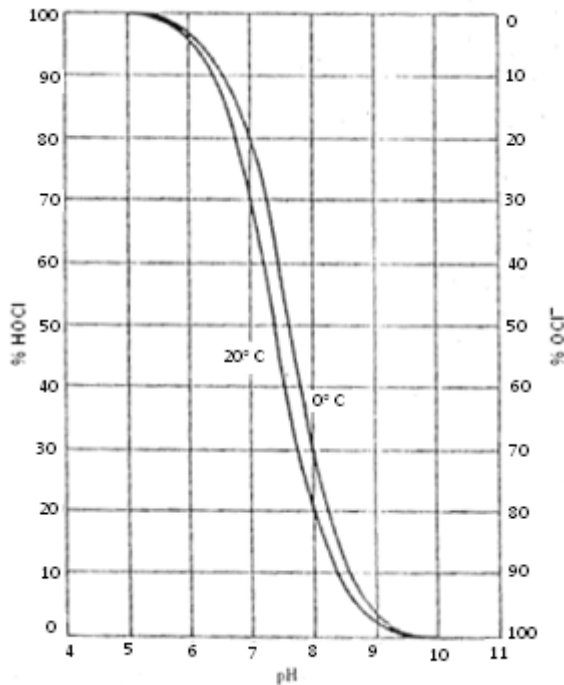


Fig.1.2.- Distribución del ácido hipocloroso (HOCl) y del ion hipoclorito (OCl⁻), como una función del pH. [9]

Debido a que las especies presentes están relacionadas con el pH, debe esperarse una relación entre éste con la eficiencia. Empíricamente se ha encontrado que la dosis de cloro debe incrementarse para compensar pH altos.

La relación entre el tiempo de contacto y la concentración de cloro puede expresarse por la relación:

$$C^n t_p = K \quad (1.12)$$

en donde:

C = Concentración de cloro, mg/L.

t_p = Tiempo requerido para determinado porcentaje de eliminación, min.

n, K = Constantes experimentales para un sistema dado.

Un ejemplo de estas relaciones es reportado por Berg [7], tal como se muestra en la figura 1.3.

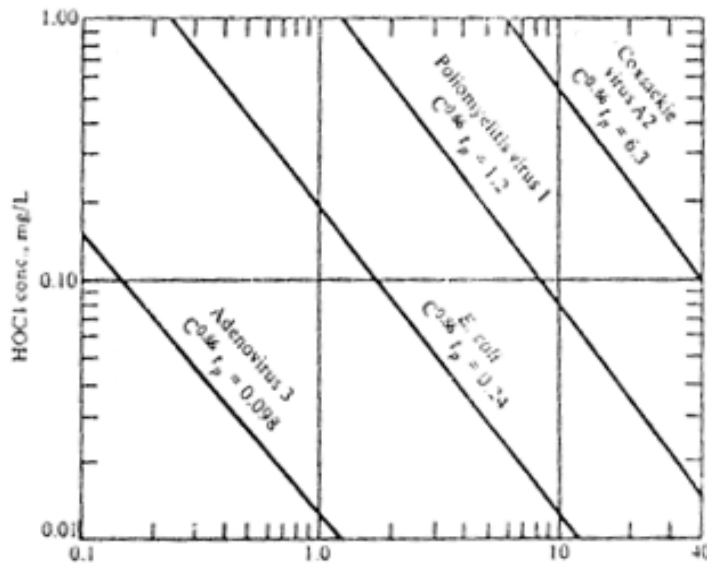


Fig.1.3.- Concentración de cloro residual libre y tiempo de contacto necesario para eliminar el 99% de microorganismos a 0 y 6° C.

Los efectos de la variación de temperatura pueden ser modelados por la ecuación de Van't Hoff – Arrhenius:

$$\ln \frac{t_1}{t_2} = \frac{E' (t_2 - t_1)}{R T_1 T_2} \quad (1.13)$$

donde:

t_1, t_2 = Tiempos requeridos para cierta eliminación, min.

T_1, T_2 = Temperaturas correspondientes a t_1 y t_2 , °K.

R = Constante de los gases.

E^1 = Energía de activación, relacionada con el pH como se muestra en la tabla 1.1:

Tabla 1.1.- Energías de activación para soluciones acuosas de cloro. [7,8]

| pH | E ¹ , Cal |
|------|----------------------|
| 7.0 | 8, 200 |
| 8.5 | 6, 400 |
| 9.8 | 12, 000 |
| 10.7 | 15, 000 |

Las reacciones de los constituyentes del agua y del cloro pueden agruparse en:

1.1.1 Aquellas provocadas por la luz del sol

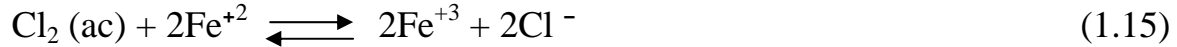
Las soluciones acuosas del cloro no son estables cuando están expuestas a la luz solar. La radiación en la región ultravioleta provee energía para la reacción del cloro con el agua:



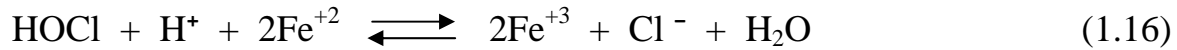
Esta reacción es válida para la mayor parte del cloro consumido en albercas exteriores.

1.1.2 Reacciones con compuestos inorgánicos

Las reacciones entre el cloro y compuestos inorgánicos reducidos, por ejemplo: Mn (+2), Fe (+2), NO₂⁻ y S (-2), son generalmente rápidas. Así, cuando el cloro se usa para oxidar hierro ferroso y hierro férrico, por ejemplo en tratamiento de aguas subterráneas, las reacciones:



Ó

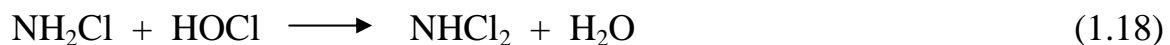


proceden casi instantáneamente a valores de pH cercanos y arriba de la neutralidad. No aparecerá cloro residual hasta que todo el Fe^{+2} haya sido oxidado a Fe^{+3} . Las reacciones del cloro con S (-2), y NO_2^- siguen este comportamiento excepto con M(+2) que ocurre solamente a pH mayores de 8.5.

1.1.3 Reacciones con el amoniaco

Las reacciones del cloro con amoniaco y nitrógeno orgánico son bastante diferentes de aquellas del cloro con otros compuestos inorgánicos y orgánicos. El cloro reacciona con amoníaco para producir una serie de compuestos clorados llamados cloraminas (NH_2Cl , NHCl_2 , NCl_3) y eventualmente oxida el amoníaco hasta gas nitrógeno o a alguna variedad de productos libres de cloro que contienen nitrógeno, por ejemplo: Hidracina (N_2H_4), hidroxilamina (NH_2OH), nitrógeno (N_2), Óxido nitroso (N_2O) Óxido de nitrógeno (NO), Nitrito (NO_2^-), Tetraóxido de nitrógeno (N_2O_4) y nitrato (NO_3^-).

Las reacciones de formación de cloraminas son las siguientes:



1.1.4 Reacciones con sustancias orgánicas

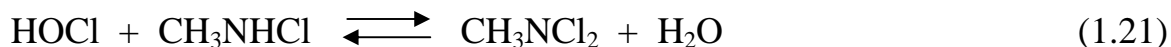
El cloro, usado en concentraciones adecuadas para tratamiento de aguas y de aguas residuales, reacciona con compuestos orgánicos en el agua. En algunas reacciones tales como aquellas con compuestos de nitrógeno orgánico y fenoles, el cloro sustituye a un átomo de hidrógeno, produciendo así los compuestos clorados. El cloro también puede incorporarse dentro de la molécula por reacciones de adición o puede reaccionar con un compuesto para oxidarlo sin clorarlo. Algunos de los orgánicos clorados que se forman durante la cloración de aguas naturales y residuales se presentan a continuación (otros no han sido identificados):

1.1.4.1 Reacciones con nitrógeno orgánico

El cloro reacciona fácilmente con muchos compuestos de nitrógeno orgánico, tales como la metilamina:



formándose la diclorometilamina:

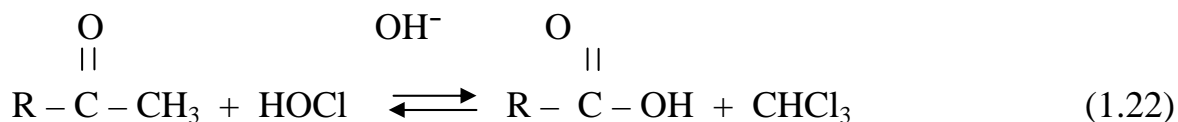


1.1.4.2 Reacciones con fenoles

En este tipo de reacciones el cloro reacciona con el fenol o con los compuestos que contienen grupos fenólicos. Debido a que estos compuestos pueden presentarse en abastecimiento de agua como resultado de las descargas industriales o procesos de decaimiento natural y debido a que varios de los fenoles clorados son muy olorosos, su formación y control tiene gran importancia.

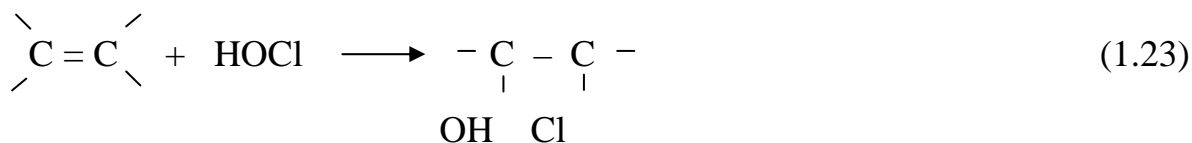
1.1.4.3 Formación de trihalometanos

Estos compuestos tienen la forma general CHX_3 , donde X puede ser Cl, Br ó I. El cloroformo, CHCl_3 , es de interés particular debido a que se sospecha que es cancerígeno.



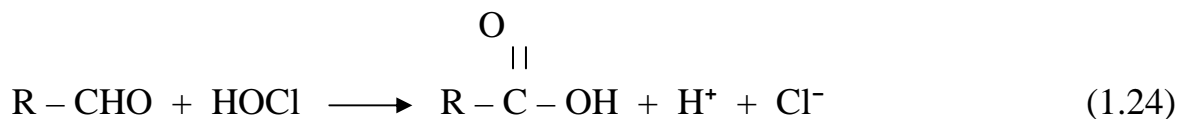
1.1.4.4 Reacciones de adición y oxidación

El cloro se puede adicionar a compuestos orgánicos con doble ligadura:

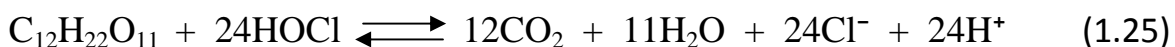


Para muchos compuestos con dobles enlaces, esta reacción es bastante lenta para ser de importancia en tratamiento de aguas.

El cloro puede también oxidar a compuestos orgánicos como sigue:



La reacción de oxidación con un carbohidrato es muy lenta y se producen CO_2 y H_2O , lo mismo sucede con una grasa o con un ácido graso, por ejemplo:



1.2 Cloruros.

El ión cloruro es uno de los iones que siempre están presentes en las aguas, dependiendo su concentración de las condiciones ambientales y encontrándose dentro de límites muy amplios.

Para fuentes de abastecimiento de agua potable se permite una concentración máxima de 250 mg/L de Cl^- , para riego agrícola de 147.5 y en agua dulce de 250 para protección de la vida acuática.

Estas cantidades son muy pequeñas; sobre todo si se considera y se compara con el contenido en el agua de mar, el cual alcanza un 2.7% aproximadamente de NaCl.

El origen de los cloruros en las aguas se debe a múltiples causas, entre ellos están el intercambio con mares actuales o antiguos. En efecto, son causas de la salinidad la contaminación de las aguas dulces por agua de mar (pozos y ríos), como en la Costa de Hermosillo, el lavado de terrenos salados, o al llegar a la superficie del suelo sales por capilaridad, las cuales posteriormente pasan a las aguas. Igualmente, la disolución de las rocas y terrenos es otro origen de los cloruros en el agua.

Un hecho importante es la contaminación de los pozos profundos situados cerca de la costa, por el agua de mar o por ríos salados. Para que en los pozos haya contaminación por agua de mar, es necesario que la profundidad del pozo y el nivel del mar en el mismo, esté por debajo del nivel del mar, además de que la estructura geológica del terreno sea tal que permita la filtración del agua. A veces, aunque se cumplan las condiciones anteriores, no hay normalmente contaminación hasta que son muchos pozos perforados y se ha extraído una cantidad de agua tal que se altera el equilibrio de la misma.

Como los cloruros son sustancias inorgánicas en solución, no actúan sobre ellos los procesos biológicos. Tampoco la sedimentación tiene influencia apreciable en su contenido en el agua, pueden eliminarse por intercambio iónico o por ósmosis inversa.

1.3 Cloradores.

Esencialmente los cloradores consisten de diversas combinaciones de válvulas de reducción de presión que funcionan por medio de diafragmas mecánicos, o flotadores operados hidráulicamente, orificios u otros tipos de medidores, para verificar el gasto de cloro gaseoso después de que se ha reducido a una presión uniformemente baja, y dispositivos para hacer una solución acuosa del gas e inyectar ésta al agua que se vaya a tratar. El tipo descrito es el de uso más general y comúnmente se conoce como clorador de solución. Las figuras 1.4 y 1.5 son ilustraciones típicas de los diagramas de tres diferentes marcas de cloradores que pueden adquirirse en el comercio especializado.

En ocasiones, cuando no se dispone de agua o de electricidad, o de ambas, se usan cloradores de “inyección directa”. Esta clase de equipo es esencialmente el mismo que el de alimentación en solución, con la sola diferencia de que no hay dispositivo para hacer e inyectar una solución acuosa. Más bien, el gas se conduce directamente por tuberías hasta el agua. En el punto de aplicación se usan difusores, conectados en el extremo de la tubería adecuada.

Para una operación adecuada, el equipo de cloración requiere cuidados y atención. Deben ponerse a disposición del operador del equipo las recomendaciones e instrucciones del fabricante y éstas deben seguirse estrictamente. A su vez, es conveniente que el operador se familiarice completamente con el equipo, de manera que esté en aptitud de hacer los ajustes necesarios y las reparaciones menores.

Pueden localizarse las fugas de cloro manteniendo abierto un frasco de amoníaco cerca de posibles fugas. Si el cloro se está escapando, se formarán humos blancos de cloruro de amoníaco perfectamente visibles. Como el cloro gaseoso es irritante, debe tenerse cuidado de no inhalar nada de gas. Deben

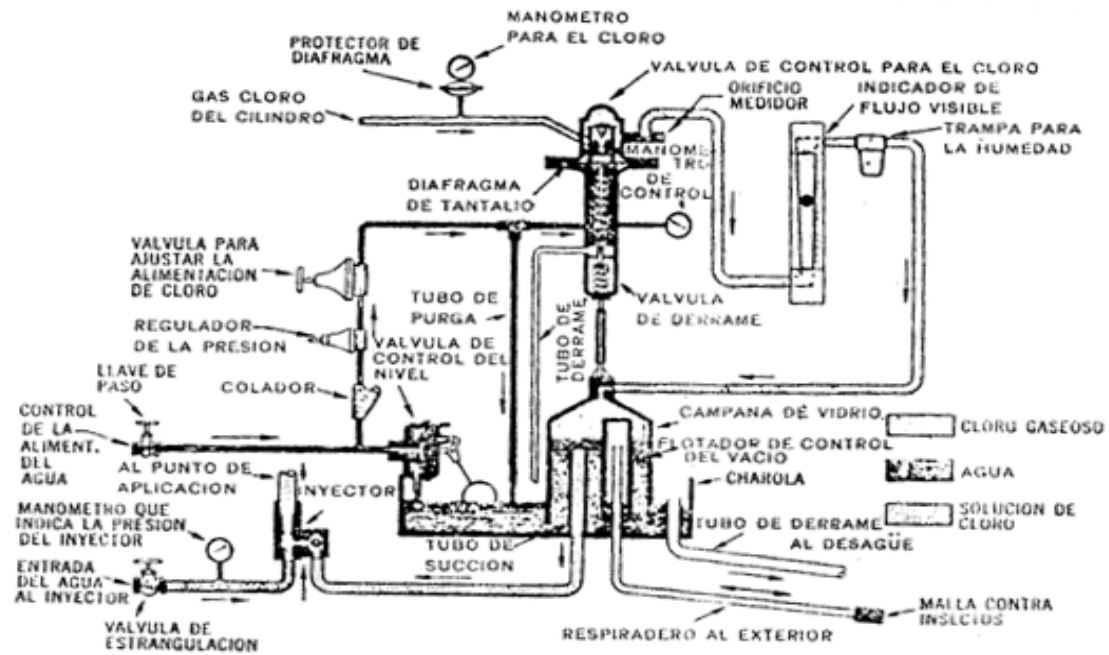


Fig. 1. 4.- Diagrama de flujo de un clorador. [3]

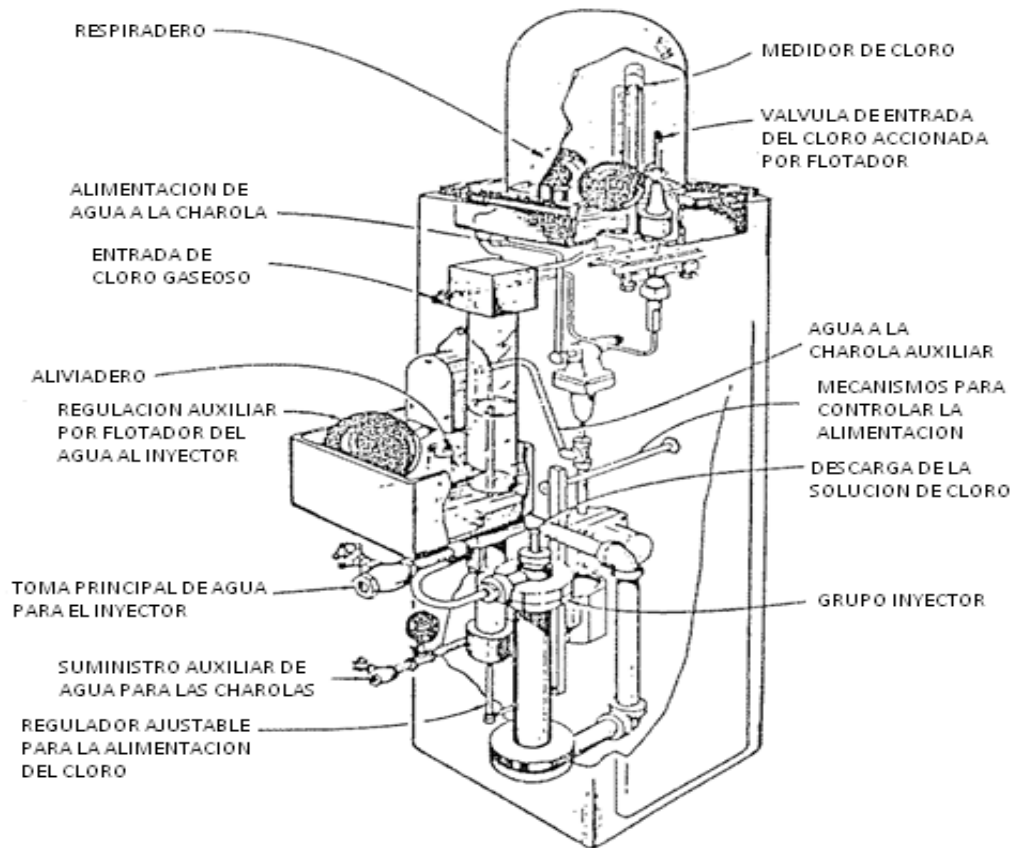


Fig. 1.5.- Clorador. [3]

guardarse las máscaras de gas en un lugar fácilmente accesible, apartados del clorador o de la caseta de cloración, de manera que puedan estar disponibles para cuando se les necesite.

Los cilindros de cloro deben colocarse sobre básculas exactas, para que pueda pesarse el cloro y conocer exactamente la cantidad usada.

De ser posible, debe tenerse equipo duplicado, para que el de reserva pueda ponerse en servicio en cuanto se necesite.

Como es tan grande el número y tipo de cloradores, el operador debe documentarse en publicaciones especializadas que editan los fabricantes de estos equipos, donde se obtienen descripciones detalladas de cualquier clorador particular de interés.

1.4 Hipocloración.

Otros compuestos de cloro, como el hipoclorito de sodio o de calcio, tienen también propiedades desinfectantes. Estos hipocloritos se agregan generalmente en formas de solución al agua que se va a tratar, aunque algunas veces se agregan directamente en forma de polvo.

Las soluciones de hipoclorito se expanden bajo diferentes denominaciones comerciales y pueden adquirirse fácilmente, variando sus concentraciones de cloro disponible (entre 3 y 15%) y son razonablemente cuando se guardan en lugares frescos y oscuros.

El hipoclorito de calcio, conocido también como cloruro de cal, debe adquirirse en cantidades pequeñas, conforme se vaya necesitando, por ser relativamente inestable. Por lo general, el producto químico disponible en el comercio contiene de 25 a 37% de cloro disponible, siendo lo demás material inerte, aunque existen otras marcas comerciales cuyo contenido de cloro alcanza hasta un 75%. Estos productos son más caros pero más estables que el cloruro de cal.

Las soluciones de hipoclorito, tal como se usan en los trabajos de tratamientos de aguas, se diluyen en concentraciones de 0.5 a 1% en peso. Al preparar estas soluciones debe tenerse en cuenta el contenido de cloro de la solución concentrada. Por ejemplo, si se van a preparar 120 litros de solución al 1% usando cloruro de cal con 33% de cloro disponible, entonces el peso de cloruro de cal será $(120 \times 0.01) \div 0.33 = 3.64$ Kg. Dicho de otra manera: deben agregarse 3.64 Kg. de cloruro de cal al 33% a 120 L. de agua para preparar una solución al 1%.

Aunque una solución de hipoclorito puede adicionarse mediante dispositivos improvisados, comúnmente se usa bomba de diafragma o tanques a presión. Cuando el gasto de agua no es uniforme puede usarse un hipoclorador de alimentación proporcional.

1.5 La práctica de la cloración.

Las aguas naturales están formadas de soluciones complejas de muchas sustancias, la mayoría de las cuales puede ignorarse, pero como ya se mencionó, algunas de ellas tienen gran influencia sobre cloración. Tales sustancias son:

Los **sólidos suspendidos**, los cuales pueden poner una barrera a las bacterias, protegiéndolas de la acción destructora del cloro.

La **materia orgánica**, la cual reaccionaba con el cloro de tal modo que le quita sus propiedades desinfectantes.

El **amoníaco**, que reacciona con el cloro libre para formar compuestos del cloro y que tienen cualidades desinfectantes, menos eficaces que las del cloro libre.

La **reacción del agua**, indicada por el valor de su pH. Las aguas de baja alcalinidad y pH bajo son desinfectadas más fácilmente.

Los **nitritos**, que reaccionan con el cloro libre y lo eliminan y que además pueden producir un color falso cuando se hace la prueba de la ortotolidina.

El **manganeso**, que produce un color falso cuando se hace la prueba de la ortotolidina.

El **hierro**, que cuando está presente en concentraciones de 1 mg/L ó más, causa un error de lectura cuando se usa la prueba de la ortotolidina. El hierro y el manganeso, cuando están en su forma reducida, reaccionan también con el cloro y por lo tanto debe agregarse una cantidad adicional a la requerida para la desinfección.

La rapidez de la desinfección es proporcional a la temperatura del agua, de manera que, suponiendo los otros factores iguales, la cloración es más eficaz a temperaturas altas. Por otro lado, el cloro es más estable en agua fría y permanecerá mayor tiempo en ella. Hasta cierto grado, esto compensa la menor velocidad de desinfección en agua fría.

El tiempo de que se puede disponer para que el cloro actúe sobre los constituyentes del agua es uno de los aspectos más importantes en la práctica de la cloración. El tiempo mínimo de reacción debe ser de 10 a 15 min., pero es preferible que se dejen transcurrir varias hora para garantizar una desinfección más efectiva, sin que el agua llegue al consumidor con una concentración indeseable de cloro residual que podría ser inconveniente debido a la presencia de sabores y olores.

Si se quiere llevar a cabo con éxito una cloración, el cloro debe agregarse de manera que:

(a) Se mezcle por igual y completamente con todas las proporciones del agua a tratar.

(b) Sea continua.

(c) Se aplique en cantidad suficiente para la clase de agua que se esté tratando según las condiciones prevalecientes y para que se llegue a verificar el grado de tratamiento que se desee.

En el diseño de los sistemas de cloración se prevé el mezclado adecuado y la continuidad de la aplicación. La cantidad de “Cloro suficiente” varía en los diferentes abastecimientos de agua y conocerla es una de las obligaciones primordiales del operador.

1.6 Factores que influyen sobre la desinfección.

A continuación se presentan algunos de los factores más importantes que influyen sobre el cloro residual deseado.

1.6.1 Tiempo y concentración.- Estos dos factores deben considerarse como mutuamente ligados, pues, por medio de ambos, se toma en consideración la duración del periodo de reacción disponible para la desinfección, así como la clase y cantidad de cloro residual. Si tiene que confiarse en el cloro combinado, que es un desinfectante débil, debe proporcionarse una concentración mayor, actuando durante un tiempo mayor. Por otro lado, si se va a mantener cloro residual libre, el cual es un desinfectante activo, entonces el periodo de reacción puede ser proporcionalmente menor. La experiencia ha demostrado que un cloro residual libre de 0.05 mg/L, con un periodo de reacción de 10 min. a un pH de 7, matará las bacterias igual que un cloro residual combinado de 0.6 mg/L con un periodo de reacción de 60 min. Cuando el tiempo de reacción de que se disponga sea corto, digamos de unos 5 min., un cloro residual libre disponible de 0.05 proporcionará una desinfección eficaz. La figura No. 1.6 ilustra gráficamente estos efectos.

1.6.2 Temperatura.- La temperatura del agua afecta sensiblemente la acción desinfectante del agua residual. Para lograr la misma acción bactericida con una temperatura de 4.5°C, en comparación con la temperatura de 21°C, siendo iguales todos los demás factores, la concentración del cloro residual combinado debe ser más del doble de la concentración del cloro residual libre. Esto se muestra en la figura No. 1.7.

1.6.3 pH.- Como ya se ha dicho antes, el pH del agua afecta la acción desinfectante del cloro, particularmente la del cloro residual combinado. A un pH de 6.5 y una temperatura de 21°C, 0.3 mg/L de cloro residual combinado

causan un efecto letal del 100% en las bacterias. A la misma temperatura y un pH de 7, el cloro residual combinado debe aumentarse hasta 0.6 mg/L., y aun pH de 8.5 debe aumentarse aún más, hasta 1.2 mg/L, para lograr el mismo efecto letal sobre las bacterias. En la figura No.8 se muestran datos para otras condiciones de temperatura y de pH, así como de valores de cloro residual libre.

El uso tan extendido del cloro en la práctica del tratamiento de aguas ha dado lugar a que se desarrolle una terminología especial que describe el proceso.

Cuando se aplica cloro a un abastecimiento de agua, antes que otro tratamiento cualquiera, como la coagulación, etc., en la práctica se le llama “precloración”. A la inversa, cuando el cloro se aplica después de un proceso cualquiera de tratamiento, como la filtración, etc., se le llama “poscloración”.

Cuando se aplican juntos el amoníaco y el cloro, en la práctica se le llama “cloraminación” o también “Cloración residual combinada”.

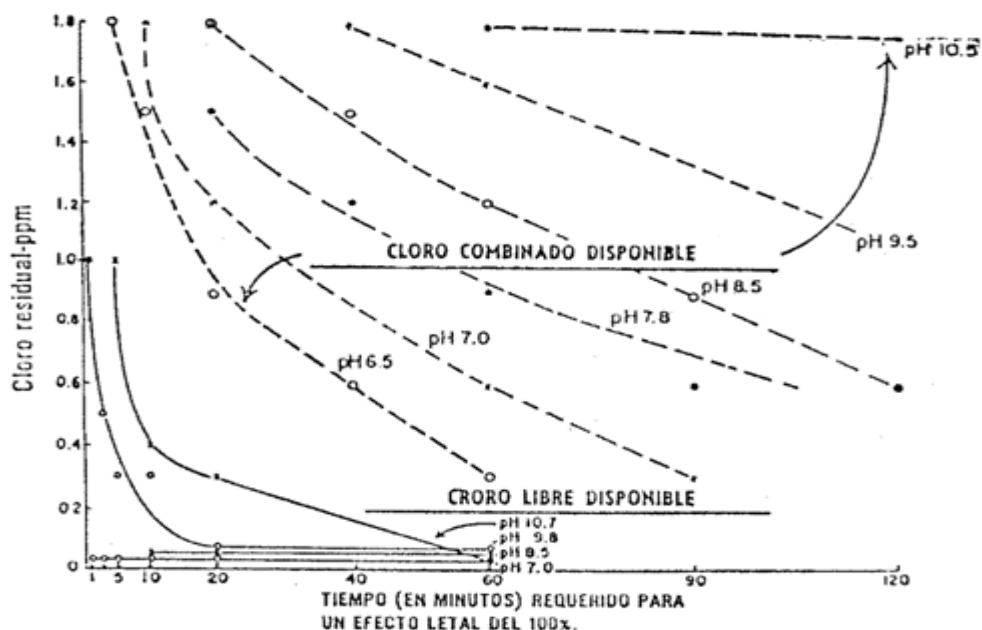


Fig.1.6.- Efecto de la clase de cloro residual y el tiempo. [3]

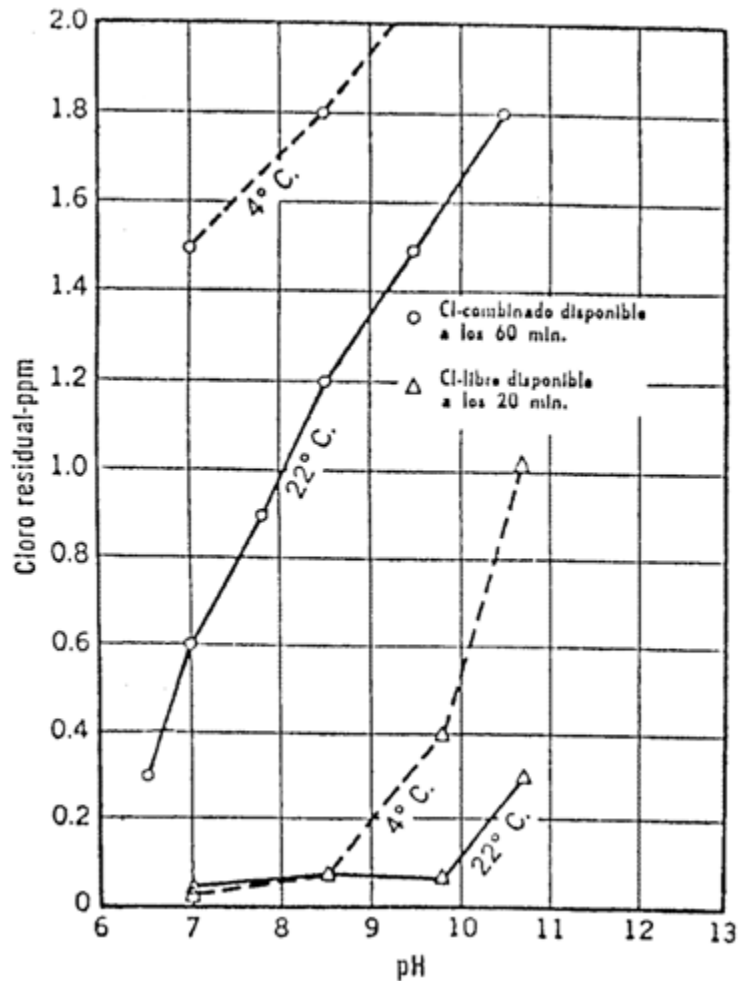


Fig. 1. 7.- Efecto de la temperatura sobre el cloro residual. [3]

A la aplicación de dosificaciones de cloro en exceso se le llama “sobrecoloración”. El tratamiento deliberado del agua, para remover el cloro residual, se conoce como “decoloración”. Por lo general, una “sobrecoloración” va seguida de una “decoloración”, con el propósito de mantener el cloro residual deseado. Como resultado de la práctica de la “sobrecoloración” puede producirse un “quiebre” en la curva de demanda de cloro (Fig. No. 1). Bajo estas circunstancias, esta práctica se conoce como cloración “al punto de quiebre”.

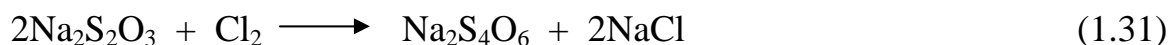
Desde que se desarrolló la prueba de la ortotolidina – arsenito, se generalizó la práctica de la cloración “a residual libre”. Esta práctica consiste

en agregar suficiente cloro para obtener un residual que consista casi completamente de cloro libre. En este caso se usa la prueba mencionada como auxiliar del control de laboratorio, pues distingue y mide cuantitativamente los residuos de cloro libre y combinado.

1.6.4 Decloración.

Algunos métodos de decloración son los siguientes; la adición de productos químicos reductores, el paso a través de lechos de carbón activado granular y la aireación. Los agentes reductores incluyen SO_2 , bisulfito de sodio (NaHSO_3) y sulfito de sodio (Na_2SO_3). En la práctica se utiliza generalmente el bisulfito, más estable y barato que el sulfito. Las muestras de agua colectadas para análisis bacteriológicos generalmente se decloran añadiéndole tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), ya sea en forma de solución o como cristales. El carbón activado granular adsorbe cloro y se oxida mediante éste a CO_2 . En la práctica el contacto con el carbón activado pulverizado es demasiado corto para dar esto como resultado. El cloro, ácido hipocloroso, bióxido de cloro y tricloruro de nitrógeno son lo suficientemente volátiles y se les remueve por aireación. Algunas especies del cloro no lo son.

Las reacciones de decloración son las siguientes:



1.7 Ventajas de la cloración a residual libre.

A veces se practica la cloraminación, debido a la naturaleza desusada de un abastecimiento de agua, como en el caso de descargas de desechos industriales que contengan fenol. En tales casos, para que sean mínimas las dificultades debidas al sabor y al olor, se agrega primero el amoníaco y después el cloro. Sin embargo, debido a sus muchas ventajas, incluso la facilidad de control, la práctica de la cloración a residual ha suplido esta técnica.

Las ventajas de la cloración a residual libre son:

Se puede obtener una desinfección efectiva con un período de contacto de 10 minutos, mientras que el cloro residual combinado requiere de 60 min. cuando menos.

No se requiere variar el cloro residual con cambios en el pH desde 6 hasta 8; mientras que el cloro residual combinado debe modificarse al aumentar el pH.

No se requiere modificar sensiblemente el cloro residual al cambiar la temperatura, mientras que el cloro residual combinado debe aumentarse notablemente al disminuir la temperatura, siendo iguales los demás factores.

Con muchas aguas se logra un notable mejoramiento en lo concerniente a sabores y olores, si el cloro residual combinado se reemplaza por una cloración a residual libre.

Después de que se ha llevado a cabo una cloración a residual libre por todo un sistema de distribución, persiste y puede mantenerse, evitando reducciones en las líneas de distribución.

La concentración del cloro residual “libre”, así como la proporción relativa entre los cloros residuales “libre” y “combinado”, son importantes cuando se practica la cloración a residual libre. En un determinado abastecimiento de agua, aquella porción del cloro residual que sea “libre”, sirve como medida de la capacidad para oxidar la materia orgánica. Cuando se

practica la cloración a residual libre, se recomienda que, cuando menos, el 85% del cloro residual total quede en estado “libre”.

Empleando como guía los principios mencionados, e introduciendo un factor de seguridad, para un período de desinfección de 10 min., en la tabla 1.2 se muestra las concentraciones mínimas de cloro deseables, de acuerdo al pH.

Tabla 1.2 Concentraciones mínimas recomendadas. [4]

| Valor del pH | Conc. Mínima de cloro residual libre, en mg/L, con un periodo de desinfección de 10 min., cuando menos. | Conc. Mínima de cloro residual combinado, en mg/L, con un periodo de Desinfección de 60 min. cuando menos. |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6.0 | 0.2 | 1.0 |
| 7.0 | 0.2 | 1.5 |
| 8.0 | 0.4 | 1.8 |
| 9.0 | 0.8 | No es practicable |
| 10.0 | 0.8 | No es practicable |

1.8 Dióxido de cloro.

También se ha empleado el bióxido de cloro (ClO_2) en los trabajos de abastecimientos de aguas. El ClO_2 es un gas pesado, amarillo rojizo, de olor desagradable y picante. Es un agente oxidante muy activo y se ha encontrado que es eficaz para controlar los olores y sabores originados por la contaminación química, especialmente la de compuestos del tipo fenólico.

También se obtienen disminuciones satisfactorias de bacterias, principalmente a pH elevados.

Este gas se produce en la planta de tratamiento a medida que se va necesitando. Resulta de la reacción entre el clorito de sodio y una solución concentrada de cloro a un pH inferior a 4.

Como el ClO_2 se genera a medida que se va necesitando, es necesario que la reacción se haya completado antes de agregar al agua, es indispensable que el clorito de sodio y el cloro pasen por una cámara de reacción que proporcione un tiempo de retención lo suficientemente grande y una agitación o mezclado adecuados.

Cuando la solución de cloro está en forma de hipoclorito, es necesario agregar un ácido antes de que se ponga en contacto con el clorito de sodio, para bajar el pH a 4 o menos, como se ha indicado antes.

Se usa como pretratamiento o postratamiento. Se requiere más ClO_2 en el primer caso, debido a la demanda que pueda haber por parte del agua cruda.

Las dosificaciones requeridas para que el tratamiento sea efectivo se determinan de manera muy similar a las de la cloración, es decir, por medio de ensayos biológicos, pues la demanda de ClO_2 es variable, según el abastecimiento de agua, y está sujeta a cambios.

Su posible reducción a clorato, sustancia que puede ser tóxica para los humanos, hace cuestionable su uso en agua potable.