

ESTUDIO DE LA PREOXIDACIÓN POR EL CLORO, DIÓXIDO DE CLORO O PERÓXIDO DE HIDRÓGENO COMO MEJORAMIENTO DE LOS PROCESOS CONVENCIONALES UTILIZADOS PARA LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA

Nadine Leoni* e Iván Rojas**

RESUMEN

Se estudió el comportamiento de tres oxidantes –Cloro, Dióxido de Cloro y Peróxido de Hidrógeno– en el mejoramiento de unos procesos convencionales aplicados para tratar las aguas del embalse de San Rafael (Santa fe de Bogotá). El coagulante utilizado fue un Sulfato de Aluminio comercial (tipo B). Se analizaron mediante la realización de pruebas de jarras tratamientos de ciclo completo, en coagulación por adsorción - neutralización de cargas y coagulación de barrido, y un tratamiento por filtración directa mediante un montaje de laboratorio adaptado. Cuando se realizaba un proceso de coagulación por adsorción, se encontró una mejora significativa con la utilización de preoxidantes tanto en remoción de turbiedad y de carbono orgánico disuelto, una significativa disminución del potencial de formación de trihalometanos si se aplica previamente Dióxido de Cloro o Peróxido de Hidrógeno frente al uso de una precloración. Se averiguó que la utilización de un proceso de preoxidación previamente a una coagulación por adsorción seguida o no de una fase de sedimentación previa a la filtración, permite una disminución significativa en los costos de insumos; frente a un tratamiento de coagulación mejorada (barrido) sin sacrificar significativamente la eficiencia de remoción de turbiedad o carbono orgánico disuelto.

INTRODUCCIÓN

Los avances tecnológicos tanto en los tratamientos como en los métodos analíticos, el conocimiento de los efectos sobre la salud humana de los diferentes compuestos presentes en el agua, las sustancias utilizadas para su tratamiento y los subproductos originados por estas, han llevado a que las legislaciones sean cada vez más exigentes acerca de los valores máximos permitidos de

las concentraciones de ciertas sustancias en el agua potable.

En Colombia la última norma que regula las concentraciones finales de compuestos en el agua potable es el decreto 475 de 1998 del Ministerio de Salud, el cual fija una serie de condiciones para la calidad del agua potable, las cuales anteriormente no eran tenidas en cuenta en nuestro medio.

* Profesora asistente del departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes.

** Estudiante graduado de la Maestría de Ingeniería Ambiental de la Universidad de los Andes.

La preoxidación se utiliza en el proceso de Coagulación - Floculación, pues facilita la remoción de materia orgánica, color, olores y sabores, y metales disueltos (Hierro y Manganeseo principalmente). El oxidante más utilizado es el Cloro. Su gran popularidad radica en su facilidad de aplicación en el tratamiento, su gran poder oxidante y los bajos costos de los insumos para su aplicación. Sin embargo la formación de trihalometanos o THMs, especialmente el Cloroformo y otros compuestos organoclorados (Cuya concentración máxima permitida según el decreto 475 de 1998 es de 0.1 mg/L), llevó a buscar otras alternativas a su uso como lo son: el Ozono, el Dióxido de Cloro y el Permanganato de Potasio entre otros.

En esta investigación se utilizaron tres oxidantes: Cloro, Dióxido de Cloro y Peróxido de Hidrógeno, se discuten sus ventajas y desventajas en su utilización como ayudantes a la coagulación. Se analizan tres tipos de tratamiento: tratamiento Convencional o de ciclo completo con Coagulación por Adsorción, Filtración Directa y Tratamiento de ciclo completo con Coagulación Mejorada.

METODOLOGÍA

Se analizaron tres tipos de tratamientos: Ensayos de tratamiento convencional o de ciclo completo en mecanismo de coagulación por adsorción - neutralización de cargas de los coloides, ensayos de filtración directa y ensayos de tratamiento convencional con coagulación mejorada (Coagulación de Barrido). Se utilizó como coagulante un Sulfato de Aluminio comercial, tipo B ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 H_2O$).

El agua utilizada en los ensayos, es el agua del embalse de San Rafael (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Santa Fe de Bogotá). Dichas aguas tienen como características una gran cantidad de COD (Normalmente mayor de 5 mg/L) y una baja turbiedad (Entre 3 y 6 N.T.U.).

Fue necesario el montaje de un sistema normalizado para la producción de una solución concentrada de Dióxido de Cloro⁰.

Parámetros Analizados

Como parámetros indicadores de la eficiencia del proceso se tomaron: El carbón Orgánico Disuelto (COD) y la turbiedad; Adicionalmente se utilizaron como indicadores de cantidad de materia orgánica el color verdadero y la absorbancia de luz ultravioleta a 254 nm. Fue evaluada la cantidad residual de cada oxidante, la cantidad de aluminio residual, la cantidad de Cloroformo residual en algunos ensayos de tratamiento con Cloro y determinación del potencial de formación de trihalometanos (THMFP) de las aguas tratadas, el clorito residual en los tratamientos con dióxido de Cloro y el pH final en cada ensayo realizado.

Montaje del Sistema de Filtración Directa

Se construyó un sistema de filtración directa, el cual consistió en: un reactor normalizado completamente mezclado¹, una bomba para darle al sistema una velocidad de filtrado de 4 GPM, Un filtro con un lecho mixto (Grava 8 cm, Arena Gruesa 0.8 cm, Arena Delgada 2 cm y Antracita 6 cm.) y un sistema de medición de turbiedad de flujo continuo. El sistema se optimizó por determinación de: dosis de Coagulante, Gradientes de las fases de Coagulación y Floculación, y Tiempos de Coagulación y de Floculación.

Ensayos Preliminares

Tanto para el tratamiento convencional por Coagulación por Adsorción, como en el tratamiento de Filtración Directa se encontró como dosis óptima 8 mg/L de coagulante (Sulfato de Aluminio) sin añadir oxidante. Se analizó la repetitividad de los ensayos teniendo en cuenta tanto la remoción de turbiedad como la remoción de COD en filtración directa y en tratamiento convencional. Los errores máximos encontrados en Remoción de turbiedad fueron de 6.40% y de COD de 9.32%.

RESULTADOS

Ensayos por Tratamiento Convencional con Coagulación por Adsorción y Tratamiento por Filtración Directa

Los ensayos se realizaron aplicando una dosis de Sulfato de Aluminio ($Al_2(SO_4)_3$) de 8 mg/L. Para

encontrar la dosis óptima de cada oxidante se varió la dosis, hasta encontrar los puntos óptimos de remoción tanto de la turbiedad como del COD.

Remoción de COD

La mejora en remoción de COD es apreciable. En general no se nota una diferencia significativa de los resultados encontrados entre el tratamiento convencional y la filtración directa (Figura 1). De valores finales entre 1.75 y 2.25 mg/L de COD sin la utilización de oxidante, se lograron valores finales de 0.5 y 0.75 mg/L de COD utilizando oxidante.

Se define como color y absorbancia U.V. específica la relación Color/COD y Absorbancia U.V./COD respectivamente. El color específico indica la proporción de compuestos aromáticos coloreados (o constituidos de varios ciclos conjugados) dentro del total del COD y la absorbancia U.V. específica representa el porcentaje en contenido de compuestos aromáticos dentro del total del COD. Los valores máximos de estas relaciones ocurren generalmente donde la remoción de COD es máxima. Se puede concluir que el oxidante ayuda de manera más eficiente la remoción de materia orgánica cuya composición molecular es sencilla que moléculas de materia orgánica complejas (Compuestos Aromáticos).

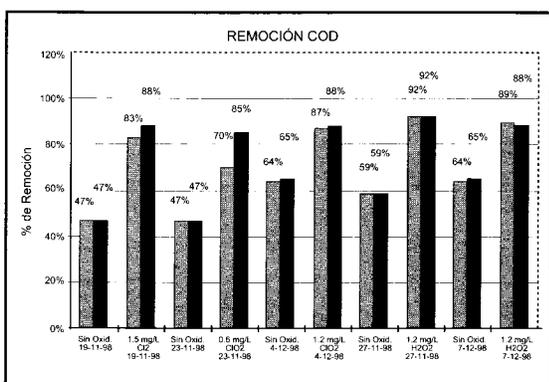


Figura 1. Remoción de COD en Tratamiento Convencional por Coagulación por Adsorción y Filtración Directa (Remociones sin Oxidante y con la dosis óptima de Oxidante).

Remoción de Turbiedad

La preoxidación en tratamiento convencional mejora la eficiencia de remoción de turbiedad aunque ésta no sea tan significativa como la remoción de COD (Figura 2). En general en tratamiento convencional para turbiedades iniciales

entre 0.80 y 1 N.T.U. sin la utilización de oxidante se lograron turbiedades residuales después del tratamiento entre 0.50 y 0.60 N.T.U. utilizando oxidante.

La mejora en la remoción de turbiedad en los ensayos de filtración directa, no es tan notoria como en los ensayos de tratamiento convencional, debido posiblemente a la eficiencia misma de la remoción causada por el filtro. En general se encontraron turbiedades finales de 0.32 y 0.35 N.T.U (86% - 90% de remoción) sin preoxidación y de 0.22 y 0.25 N.T.U. (90% al 93% de remoción) con preoxidación.

Resultados de Residuales y Subproductos de la Preoxidación o de la Desinfección

El cloro residual, no sobrepasó el valor máximo permitido por la norma (3 mg/L - Decreto 475 de 1998). Para dosis de 1 mg/L y 2 mg/L (Ensayos del 4-12-98) se encontraron valores residuales de cloroformo de 0.032 y de 0.034 mg/L, valores inferiores al límite de la norma (0.1 mg/L Decreto 475 de 1998). Se considera que las cantidades de los otros THMs en el agua son muy inferiores.

Para una dosis óptima de 1.2 mg/L de dióxido de Cloro, se encontró clorito (ClO_2^-) en concentraciones de 0.15 y 0.13 mg/L en tratamiento convencional y filtración directa respectivamente, la concentración total de ClO_2 y ClO_2^- fue de 0.80 mg/L en tratamiento convencional y de 0.78 mg/L en filtración directa.

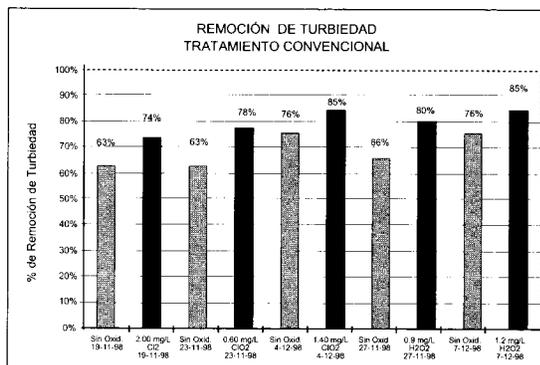


Figura 2. Remoción de Turbiedad en Tratamiento Convencional por Coagulación por Adsorción (Remociones sin Oxidante y con la dosis óptima de Oxidante).

Los resultados de los valores totales de Dióxido de Cloro y Clorito son menores a los de la normatividad exigida (1 mg/L - EPA), sin embar-

go para el tratamiento de aguas con mayor cantidad de COD, se pueden presentar problemas para la dosificación óptima de ClO_2 .

Variación del pH y la dosis de Coagulante

Se estudió la remoción de los parámetros de calidad del agua, teniendo en cuenta la variación del pH (5.5, 6, 6.5, 7, 7.5 y 8) y la dosis de coagulante aplicada (5, 6, 7, 8, 9 mg/L) con una dosis óptima de preoxidante de 1.2 mg/L de Peróxido de Hidrógeno en tratamiento convencional.

En la coagulación por adsorción - neutralización la remoción de materia orgánica se ve favorecida a valores de pH bajos. La remoción de turbiedad se encontró a un pH óptimo alrededor de 6.5.

Coagulación de Barrido o Mejorada

Se hicieron básicamente dos tipos de ensayos de coagulación de barrido.

- Bajando el pH en la coagulación a 4.5 con ácido clorhídrico, (lo cual favorece la remoción de materia orgánica), y posteriormente subiéndolos a pH de 7 en la floculación con adición de Cal, lo que favorece la remoción de turbiedad².
- Adicionando Cal al principio del tratamiento para llevar el pH final a 7.

Para ambos casos se probaron dosis de 10, 20, 30 y 40 mg/L de Sulfato de Aluminio, se hicieron tres tipos de pruebas: 1. Sin adición de oxidante, 2. Con adición de Peróxido de Hidrógeno a 1.2 mg/L y 3. Con variación de la dosis de preoxidante a la dosis óptima de sulfato de aluminio encontrada la cual fue de 30 mg/L para ambos tratamientos (Tabla 1).

30 mg/L S.A.	pH 4.5 - 7		pH 7	
	TURBIEDAD (N.T.U.)	COD (mg/L)	TURBIEDAD (N.T.U.)	COD (mg/L)
H2O2 Inic. (mg/L)				
0	0.54	0.35	0.51	0.64
0.4	0.52	0.29	0.62	0.55
0.8	0.66	0.33	0.42	0.71
1.2	0.53	0.34	0.46	0.67
1.6	0.66	0.34	0.54	0.67

TABLA 1.

Resultados de la Preoxidación en Coagulación de Barrido o Mejorada (Valores Residuales).

No se encontraron variaciones significativas de remoción de turbiedad y COD causadas por la acción de la preoxidación, posiblemente por la alta dosis de sulfato de aluminio utilizada. El tratamiento con pH = 4.5 en coagulación y pH = 7.0 en floculación tuvo una mejor remoción de COD.

Potencial de Formación de Trihalometanos (THMFP)

El ensayo de potencial de formación de trihalometanos se realizó de acuerdo al método normalizado de Standard Methods⁷. El análisis se basó en el residual de Cloroformo en el agua. Tanto el Dióxido de Cloro como el Peróxido de Hidrógeno disminuyen el potencial de formación de Trihalometanos que pueden encontrarse después de la desinfección (Figura 3). La concentración de Cloroformo utilizando una dosis de cloro de 2 mg/L de Cl_2 están muy cercanos al límite establecido por la noma (0.01 mg/L de Trihalometanos - Decreto 475 de 1998).

ANÁLISIS DE EFICIENCIA EN REMOCIÓN DE COD Y TURBIEDAD

Se compararon, tres tipos de tratamiento, coagulación de barrido con coagulación en pH = 4.5 y floculación a pH = 7, coagulación de barrido con coagulación y Floculación a pH = 7, coagulación en adsorción (tratamiento de ciclo completo) con adición de preoxidante. No se comparó la filtración directa porque ésta incluye la filtración como parte del tratamiento, lo que impide analizar la turbiedad y porque los valores en remoción de COD son similares a los del tratamiento convencional en adsorción con oxidante.

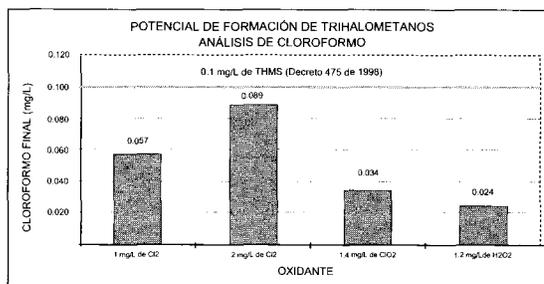


Figura 3.

Potencial de Formación de trihalometanos - Análisis de Cloroformo.

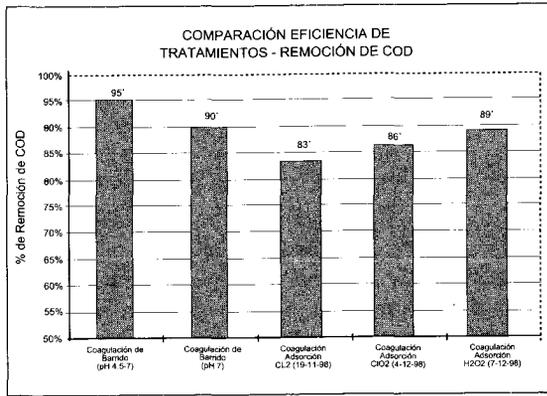


Figura 4.
Comparación eficiencia de tratamientos remoción de COD.

Resultados Aluminio Residual

En la figura 6 se ilustran los valores de Residual de aluminio encontrados en los diferentes tratamientos. El tratamiento en Adsorción produce considerablemente menos aluminio residual que los tratamientos en Coagulación de Barrido. Con todo esto los valores encontrados se encuentran dentro de la norma (0.2 mg/L de Aluminio Residual).

ANÁLISIS DE COSTOS DE PRODUCTOS PARA DOSIFICACIÓN

El análisis se hizo, para un agua con un COD de 5.70 mg/L (valor promedio de las muestras analizadas). Se analizaron tres tipos de tratamientos: tratamiento convencional sin oxidantes, con un pH de 7 para coagulación y floculación (Utilización de Cal), utilizando una dosis de sulfato de aluminio de 30 mg/L, y tratamiento convencional sin oxidantes con un pH final, con una dosis de 8 mg/L de sulfato de aluminio, con dosis de preoxidante de 2.0 mg/L de Cl₂ y 1.2 mg/L de H₂O₂ (Tabla 2). No se analizó el Dióxido de Cloro, debido a los costos de operación y montaje del sistema de producción que requiere, tampoco el tratamiento en coagulación de barrido con pH de 4.5 en la coagulación y de 7 en la floculación, debido a la gran cantidad de insumos requeridos (Ácido y Cal).

El cloro disminuye en un 11% los costos y el Peróxido de Hidrógeno los disminuye en un 65%, frente a un tratamiento convencional con coagulación mejorada.

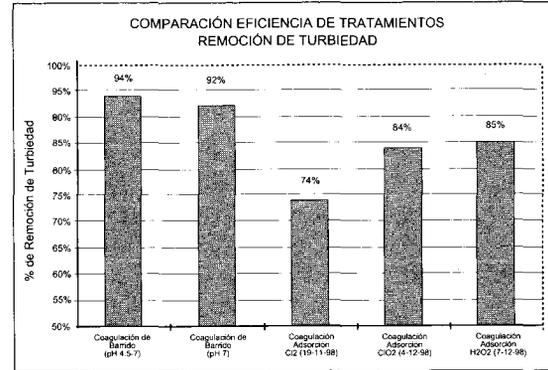


Figura 5.
Comparación eficiencia de tratamientos remoción de Turbiedad.

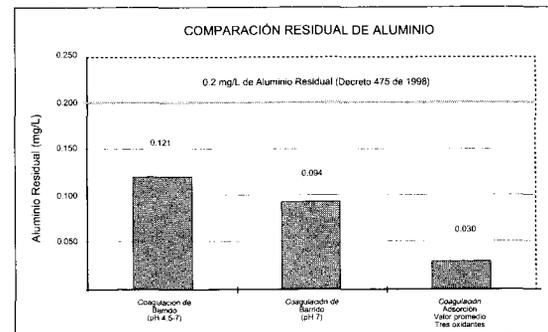


Figura 6.
Comparación valores de Aluminio Residual.

ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS				
Unidad de Análisis = m ³ de agua				
Coagulación de Barrido con Adición de Cal				
ITEM	UNIDAD	VALOR UNITARIO	CANTIDAD	SUBTOTAL
Sulfato de Aluminio	Kg	\$750	0.03	\$22.50
Cal	Kg	\$115	0.025	\$2.88
			Total	\$25.38
Coagulación por Adsorción con adición de Hipoclorito de Calcio				
ITEM	UNIDAD	VALOR UNITARIO	CANTIDAD	SUBTOTAL
Sulfato de Aluminio	Kg	\$750	0.008	\$6.00
Hipoclorito de Calcio	Kg	\$5.500	0.003	\$16.50
			Total	\$22.50
Coagulación por Adsorción con adición de Peróxido de Hidrógeno				
ITEM	UNIDAD	VALOR UNITARIO	CANTIDAD	SUBTOTAL
Sulfato de Aluminio	Kg	\$750	0.008	\$6.00
Peróxido de Hidrógeno	Galón	\$9.500	0.001	\$9.50
			Total	\$15.50

TABLA 2.
Análisis de Costos Unitarios de productos utilizados para el tratamiento del agua.

CONCLUSIONES

La preoxidación con coagulación en adsorción remueve significativamente el COD, aunque no elimina con la misma eficiencia moléculas orgánicas complejas, como moléculas orgánicas simples. Los preoxidantes mejoran la remoción de turbiedad aunque no tan significativamente como la remoción de COD.

La preoxidación no influye en la coagulación mejorada o de barrido, la causa principal es que la alta dosis de coagulante es el factor determinante en la remoción tanto de materia orgánica como de turbiedad.

Tratamientos con preoxidantes en coagulación por adsorción – neutralización de cargas resultan ser competitivos frente al tratamiento de coagulación mejorada tanto por eficiencia de remoción como por costos de dosificación.

Para el tipo de agua estudiada, el tratamiento convencional con coagulación por adsorción de cargas resulta ser más recomendable que la filtración directa, puesto que con las mismas dosis de coagulante y de preoxidante se logran valores similares de remoción de COD, con la ventaja adicional de que a escala de planta de tratamiento, se lograría alargar los tiempos de carrera de los filtros debido a la remoción de turbiedad que hay en la sedimentación en el ciclo completo (convencional) de tratamiento.

El uso de preoxidantes tiene como principales ventajas: una posible disminución en los costos del tratamiento y una disminución en el aluminio residual, entre las desventajas que tienen se encuentran: la formación de subproductos, la posibilidad de que con altas concentraciones de COD se exceda los valores límites de las concentraciones residuales de oxidante en el agua.

El Cloro continua teniendo vigencia como preoxidante, entre las ventajas que tiene está su gran poder desinfectante, la acción residual, la sencillez de su aplicación, los bajos costos de los insumos para su aplicación. El gran inconveniente que tiene es la formación de subproductos, en especial los trihalometanos y en particular de Cloroformo.

El dióxido de Cloro tiene una capacidad superior al Cloro como desinfectante, tiene también una gran acción residual en el agua, reduce significativamente el potencial de formación de trihalometanos, sin embar-

go presenta como inconvenientes: la formación de clorito y clorato como subproductos y la necesidad de montar un sistema de producción para su dosificación.

El Peróxido de Hidrógeno resultó ser el preoxidante con mejores resultados; por la reducción de potencial de formación de trihalometanos y costos de dosificación, además posee ventajas como su gran estabilidad si es guardado bajo condiciones adecuadas y el no producir subproductos. Como desventajas tiene su pobre acción desinfectante y la poca información que sobre él, en el tratamiento de aguas se tiene.

En general los valores encontrados se encuentran dentro de las normas establecidas por el decreto 475 de 1998. Los resultados acerca de trihalometanos con utilización de cloro como preoxidante, pueden ser preocupantes si se toma en cuenta que están muy cerca del límite permitido; aunque en este caso se tenían condiciones de tratamiento bien controladas. Es importante señalar el riesgo que puede generarse al aplicar cloro a un agua cruda, a la entrada de una planta de tratamiento sin tener ningún tipo de control de los subproductos clorados formados y si además no se tiene fiabilidad sobre la cantidad de cloro añadido. En cuanto a los valores de aluminio residual no se encontraron valores cercanos al límite permitido.

Referencias

- ⁰ APHA. WEF. AWWA. *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water*. AWWA. 18 Edición. 1992.
- ¹ SEPÚLVEDA M., LEONI N. "Evaluación de la Remoción de Color Aplicando la Técnica de la Floculación Lastrada en las Aguas de la Planta Wiesner". Tesis de grado presentada para optar por el título de Magíster en Ingeniería Civil. Universidad de los Andes. 1997.
- ² GREGOR J.E., NOKES C.J., FENTON E. "Optimizing Natural Organic Matter Removal from Low Turbidity Waters by Controlled pH Adjustment of Aluminium Coagulation". *Water Research*. Vol 31. No 12. Págs. 2949 - 2958.- 1997.
- ⁴ ARBOLEDA. J. *Teoría y Práctica de la purificación del Agua*. Acodal 2da. Edición. Santa Fe de Bogotá 1993.
- ⁵ AWWA. *Water Quality and Treatment*. Tercera Edición. Mac Graw Hill. Nueva York. 1995.