

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

**DISEÑO DE UN FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO PARA LA
REMOCIÓN DE CLORO LIBRE RESIDUAL DEL AGUA
POTABLE PARA USO EN LA INDUSTRIA FARMACEUTICA**

ESTEFANÍA NOBOA VELASCO

89545.

**TESIS DE GRADO PRESENTADA COMO REQUISITO PARA LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO**

QUITO
Noviembre del 2008

**Biblioteca
U.S.F.Q.**

Universidad San Francisco de Quito
Colegio Politécnico

HOJA DE APROBACION DE TESIS


Diseño de un filtro de carbón activado para la remoción de cloro libre residual del agua potable para uso en la industria farmacéutica

Estefanía Noboa Velasco

Daniela Almeida S, Dr.-Ing.
Directora de la Tesis y
Miembro del Comité de Tesis



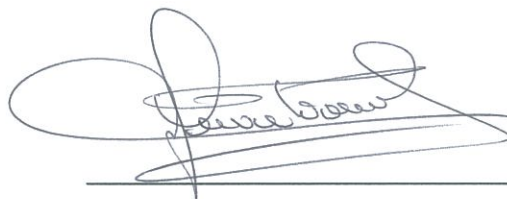
Carlos Fabara, Ph.D
Miembro del Comité de Tesis



Gustavo Muñoz, Ph.D
Miembro del Comité de Tesis



Fernando Romo, MS
Decano del Colegio Politécnico



Quito, noviembre de 2008

USFO - BIBLIOTECA	
d. Autor	
08-11	
20 FEB. 2009	00892

© Derechos de Autor
Estefanía Noboa Velasco
2008

Dedicatoria

A mi hijito amado, José Daniel, por darme las fuerzas que necesité para llegar al final de este largo camino y a mi mamá, Nancy, porque sin su ayuda esto nunca hubiera sido posible.

Resumen

En este

la comen-

matemática

de la res-

ción

oper

Agradecimientos

A Dios, por guiarme

A mis papás, por confiar en mí y apoyarme

A mi hijo, por darme las fuerzas que necesité

A mis profesores, por compartir conmigo su conocimiento

A mi familia y amigos, por acompañarme durante todo este camino

Resumen

En este trabajo se realizó el diseño y la construcción de un filtro de carbón activado para la remoción de cloro libre residual del agua potable, así como el desarrollo del modelo matemático y el sistema de control del mismo. Para esto fue necesaria la determinación de la relación óptima agua-carbón activado, para a continuación realizar la caracterización de curvas de ruptura con diferentes caudales de agua para determinar tiempos de operación óptimos del filtro, además de la concentración de ruptura y el tiempo de ruptura. Estos datos son fundamentales para poder conocer el momento en el cual el carbón activado debe someterse a un proceso de regeneración que al mismo tiempo permita determinar el tiempo de vida útil del lecho dentro del filtro. Con los datos experimentales se pudo realizar un modelo matemático para determinar el sistema de control, partiendo del cálculo de los parámetros de la ley de la velocidad, orden de reacción y constante de velocidad, tomando en cuenta que la cinética de la dechloración de agua con carbón activado responde a una reacción de primer orden.

Resumen

En este trabajo se realizó el diseño y la construcción de un filtro de carbón activado para la remoción de cloro libre residual del agua potable, así como el desarrollo del modelo matemático y el sistema de control del mismo. Para esto fue necesaria la determinación de la relación óptima agua-carbón activado, para a continuación realizar la caracterización de curvas de ruptura con diferentes caudales de agua para determinar tiempos de operación óptimos del filtro, además de la concentración de ruptura y el tiempo de ruptura. Estos datos son fundamentales para poder conocer el momento en el cual el carbón activado debe someterse a un proceso de regeneración que al mismo tiempo permita determinar el tiempo de vida útil del lecho dentro del filtro. Con los datos experimentales se pudo realizar un modelo matemático para determinar el sistema de control, partiendo del cálculo de los parámetros de la ley de la velocidad, orden de reacción y constante de velocidad, tomando en cuenta que la cinética de la dechloración de agua con carbón activado responde a una reacción de primer orden.

Abstract

This study was focused on the designing and construction of an activated carbon filter for the removal of free residual chlorine in drinking water, and the development of a mathematical model for the control system. For this it was necessary to first determine of the best relation of water to activated carbon. Also the characteristic break up / saturation curves were carried out with different water flow rates to determine optimal operation time, in addition to the break up concentration and break up time. This data is essential for the dimensioning because it provides to know the time in which the activated carbon had to undergo a regeneration process. At the same time it determines the useful life time of the activated carbon layer inside the filter. With the experimental data a mathematical model to describe the control system could be determined. This was based on the calculation of the kinetic parameters reaction order and reaction rate constant, taking into account that the kinetics of dechlorination of water with activated carbon responds to a first order reaction.

Tabla de Contenido

<i>Resumen</i>	<i>vi</i>
<i>Tabla de Contenido</i>	<i>viii</i>
<i>Lista de Figuras</i>	<i>x</i>
<i>Lista de Tablas</i>	<i>xi</i>
1. Introducción	1
1.1. Usos y tratamientos del agua potable en la industria farmacéutica	1
1.2. Pretratamiento del agua potable en la industria farmacéutica.....	1
2. Fundamentos Teóricos	4
2.1. El carbón activado como adsorbente.....	4
2.2. Propiedades del carbón activado	4
2.3. Eliminación de sustancias inorgánicas por reacción química y catalítica en la superficie del carbón activado.....	5
2.4. Eliminación de cloro libre con carbón activado del agua potable	6
2.5. Decloración del agua potable con filtros de carbón activado.....	7
2.5.1. Cinética del proceso de decloración	7
2.5.2. Curvas de ruptura y dimensionamiento de filtros de carbón activado	11
2.6. Características del filtro de carbón activado.....	13
2.7. Procesos de sanitización y mantenimiento del filtro de carbón activado.....	14
3. Métodos Experimentales	15
3.1. Caracterización de los tres tipos de carbón activado.....	15
3.2. Determinación de la relación óptima agua-carbón activado.....	15
3.3. Análisis de cloro libre	16
3.4. Dimensionamiento, construcción y puesta en marcha del filtro de carbón activado	17
3.4.1. Dimensionamiento del filtro.....	17
3.4.2. Construcción del filtro.....	18
3.4.3. Puesta en marcha y toma de muestras	20
3.5. Determinación de las curvas de ruptura.....	21
3.5.1. Curvas de ruptura del filtro de carbón activado.....	21
3.5.2. Curvas de ruptura para una mezcla arena-carbón activado	22
3.6. Análisis de la eliminación de cloro por evaporación.....	22
3.7. Reactivación del carbón activado y determinación del tiempo de vida útil.....	22
3.8. Determinación de la velocidad de reacción para la decloración de agua con carbón activado	23
4. Resultados y Discusión	25
4.1. Determinación de la relación óptima agua-carbón activado.....	26
4.2. Determinación de las curvas de ruptura	27
4.2.1. Curvas de ruptura del filtro de carbón activado.....	27
4.2.2. Curvas de ruptura del filtro para una mezcla arena-carbón activado.....	36

4.3.	Análisis de pérdida de cloro por evaporación	37
4.4.	Reactivación del carbón activado y determinación del tiempo de vida útil.....	39
4.5.	Determinación de la velocidad de reacción para la deoloración de agua con carbón activado	41
4.6.	Determinación del sistema de control	46
4.6.1.	Ecuación de Control para un Reactor PFR.....	46
5.	<i>Conclusiones</i>	51
6.	<i>Bibliografía</i>	57
I	<i>Anexos</i>	58
I.1	Nomenclatura	58
I.2	Tablas de Datos Experimentales obtenidos durante los análisis.....	59
I.2.1	Datos de la calibración del rotámetro	59
I.2.2	Datos de la determinación de la relación óptima agua-carbón activado.....	60
I.2.3	Datos de la determinación de las curvas de ruptura	61
I.3	Datos de la regeneración del carbón activado	64

Lista de Figuras

Figura 2. 1: Modelo de adsorción de cloro en el carbón activado.....	8
Figura 2. 2: Adsorción de materia orgánica en los sitios activos del carbón activado	9
Figura 2. 3: Efecto del valor ph en la composición del cloro libre.....	10
Figura 2. 4: Diagrama de las zonas de adsorción de un filtro de carbón activado.....	11
Figura 3. 1: Cambio en la coloración de la muestra según la concentración de cloro presente.....	16
Figura 3. 2: Filtro de carbón activado con rotámetro	19
Figura 3. 3: Rotámetro MPB	20
Figura 3. 4: Curva de calibración del rotámetro.....	21
Figura 4.1: Isotermas de adsorción para los tres tipos de carbones.....	27
Figura 4.2 a: Curvas de ruptura carbón activado Ecuacarbones 12x20, comparando porcentaje de remoción de cloro con respecto al tiempo	30
Figura 4.2 b: Curvas de ruptura carbón activado Ecuacarbones 12x20, comparando concentración de cloro con respecto al tiempo	30
Figura 4. 3 a: Curvas de ruptura carbón activado LIFE, comparando porcentaje de remoción de cloro con respecto al tiempo	33
Figura 4. 3 b: Curvas de ruptura carbón activado LIFE, comparando concentración de cloro con respecto al tiempo	33
Figura 4. 4: Conversión carbón Ecuacarbones 12x20 y carbón LIFE.....	35
Figura 4. 5: Resistencia de la cama de arena al flujo de agua	36
Figura 4. 6: Filtración de agua por las uniones	36
Figura 4. 7: Turbidez de la muestra.....	37
Figura 4. 8: Pérdida de cloro por evaporación	38
Figura 4. 9: Linealización de la ecuación de tendencia exponencial.....	38
Figura 4. 10: Tendencia exponencial de la pérdida de cloro por evaporación	39
Figura 4. 11: Curvas de ruptura carbón activado regenerado.....	40
Figura 4. 12: Método diferencial para determinar el orden de reacción.....	43
Figura 4. 13: Cálculo de la constante de reacción específica	45
Figura 4. 14: Reactor tubular.....	47
Figura 4. 15: Correlación, sistema de control reactor PFR.....	49
Figura I. 1: Caudal Real Vs. Caudal Nominal.....	59

Lista de Tablas

Tabla 3.1: Características de los tres tipos de carbón activado	15
Tabla 3. 2: Datos referentes al valor medio y a la relación óptima agua-carbón activado	17
Tabla 4. 1: Datos curva de ruptura lecho de carbón activado, 200, 400 y 800 cm ³ / min, carbón 12x20 Ecuacarbones.....	31
Tabla 4. 2: Datos curva de ruptura lecho de carbón activado, 200, 400, 600 y 800 cm ³ / min.....	34
Tabla 4. 3: Datos método diferencial de análisis de velocidad.....	43
Tabla 4. 4: Datos para el cálculo de k, constante de velocidad de reacción específica	45
Tabla 4.5: Variable de Salida, Ecuación de control para un PFR.....	49
Tabla 4. 6: Número de reynolds y tipo de régimen de flujo	50
Tabla I. 1: Datos de la calibración del rotámetro	59
Tabla 2. 1: Características del carbón activado	5
Tabla 2. 2: Tamaño de los poros del carbón activado	5
Tabla I. 2: Datos del análisis carbón activado Ecuacarbones 12x20	60
Tabla I. 3: Datos del análisis carbón activado Ecuacarbones 8x20	60
Tabla I. 4: Datos del análisis carbón activado LIFE.....	60
Tabla I. 5: Datos para la determinación de las isothermas de adsorción	61
Tabla I.6: Datos curva de ruptura 200 cm ³ /min carbón activado LIFE	61
Tabla I. 7: Datos curva de ruptura 400 cm ³ /min carbón activado LIFE.....	62
Tabla I. 8: Datos curva de ruptura 600 cm ³ /min carbón activado LIFE.....	62
Tabla I. 9: Datos curva de ruptura 800 cm ³ /min carbón activado LIFE.....	62
Tabla I. 10: Datos curva de ruptura 200 cm ³ /min carbón activado Ecuacarbones 12x20.....	63
Tabla I. 11: Datos curva de ruptura 400 cm ³ /min carbón activado Ecuacarbones 12x20.....	63
Tabla I. 12: Datos curva de ruptura 800 cm ³ /min carbón activado Ecuacarbones 12x20.....	64
Tabla I. 13: Datos regeneración carbón activado	64

1. Introducción

1.1. Usos y tratamientos del agua potable en la industria farmacéutica

El agua de proceso es el elemento más empleado en la industria farmacéutica. No sólo es una materia prima del proceso productivo, sino que además es usada para procesos de limpieza y enjuague, estando en contacto continuo con una gran variedad de productos y equipos farmacéuticos (1).

La fuente de agua en la industria farmacéutica es el agua potable. Esta requiere de tratamientos previos que le permita cumplir las necesidades de pureza y calidad determinada por los requerimientos en los procesos de producciones y las regulaciones pertinentes que existen en la actualidad. Regulaciones cada vez más estrictas han impulsado el desarrollo de nuevas técnicas en el tratamiento de aguas que ofrezcan total garantía de cumplimiento con los estándares de calidad (1).

Para lograr un agua de alta pureza, el agua potable debe ser sometida a varios procesos, que pueden ser clasificados en dos grupos: procesos de pretratamiento y procesos de tratamiento en si.

1.2. Pretratamiento del agua potable en la industria farmacéutica

En el proceso de pretratamiento el agua es bombeada a través de un filtro de arena para eliminar las partículas grandes (1). El agua entra a un filtro de carbón activado (CA) el cual elimina las impurezas orgánicas y el cloro. El filtro de carbón puede contaminarse excesivamente con bacterias, por lo que para sanitizarlo, es necesario contar con un suministro de vapor. Generalmente no se usan productos químicos para desinfectar los filtros de carbón activado (1). Luego el agua es pulida a través de un filtro de 5 micro-

nes antes de que entre al próximo paso de tratamiento. Si no hay demanda de agua, ésta debe ser recirculada hacia el tanque de reserva (1).

Si el agua suministrada a la empresa farmacéutica es dura necesita ser suavizada mediante la eliminación de las sales de calcio y magnesio. El agua es suavizada en una columna de intercambio iónico de zeolita donde los iones de calcio y magnesio son intercambiados por sodio. Luego el sodio tiene que ser eliminado por desionización o por ósmosis reversa, que son los procesos considerados de tratamiento (1).

Este estudio se va a centrar en los procesos de pretratamiento en donde se encuentra el proceso de filtración con carbón activado, con el que se busca que compuestos orgánicos, ciertos compuestos inorgánicos y contaminantes se reduzcan al mínimo o se eliminen completamente, dentro de los cuales se encuentra el cloro libre residual. Adicionalmente, es esencial que en el agua que va a ser utilizada en la industria farmacéutica se haya eliminado o reducido al mínimo el contenido de cloro. La eliminación de cloro debe realizarse antes del proceso de desmineralización, ya que el cloro puede causar graves daños a las resinas de las columnas desmineralizadoras (2).

1.3. Objetivos del estudio

El presente estudio tiene como objetivo diseñar, construir y poner en marcha un filtro de carbón activado para la remoción de cloro del agua potable a escala de laboratorio, sin olvidar las investigaciones previas para la determinación del tipo de carbón adecuado para el correcto desempeño del filtro y de la relación agua-carbón activado óptima para obtener la mayor remoción de cloro posible. Se realizará la caracterización de las curvas de ruptura que permitirán el conocimiento de la concentración de ruptura, el tiempo de ruptura, el caudal de trabajo óptimo para mejorar la eficiencia así como el momento en el que se debe realizar la regeneración del lecho de carbón, y como resultado el tiempo de vida útil del lecho de carbón activado utilizado en el proceso.

Adicionalmente, se busca la determinación de la cinética de reacción, mediante la aplicación de los métodos diferencial e integral de análisis de velocidad, para poder determinar los parámetros que rigen la ley de velocidad de reacción (orden de reacción y velocidad de reacción) para posteriormente poder determinar las ecuaciones del sistema de control.

2. Fundamentos Teóricos

2.1. El carbón activado como adsorbente

La adsorción es un proceso donde un sólido se utiliza para eliminar una sustancia soluble del agua. En este proceso el carbón activado es el sólido. El carbón activado se produce específicamente para alcanzar una superficie interna muy grande (entre 500 - 1500 m²/g). Esta superficie interna grande hace que el carbón tenga una adsorción ideal.

El carbón activado (CA) es un sólido que tiene propiedades que lo han hecho muy útil en el tratamiento de aguas. Una de las propiedades del CA es su alta capacidad de adsorción, lo que le permite remover contaminantes orgánicos por adsorción, otra de las propiedades del CA es su gran reactividad química lo que permite descomponer el cloro libre residual que no ha reaccionado después de que dicho compuesto se haya introducido en el agua a potabilizar para realizar una acción desinfectante (3). En estas funciones se ha considerado la aplicación de filtros de carbón activado como la tecnología más rentable. Debido a ello, prácticamente todas las industrias que requieren agua para su proceso y plantas municipales de tratamiento de agua en países desarrollados utilizan la filtración en CA como uno de los procesos básicos de purificación del agua potable, con una tendencia creciente también en los países en desarrollo.

2.2. Propiedades del carbón activado

Las propiedades superficiales del carbón activado se obtienen como resultado del proceso de activación, y dependen del material inicialmente empleado así como del proceso exacto de elaboración del carbón. De tal manera que las variaciones posibles en las características son muchas (3).

El tamaño de los poros, las características superficiales y de regeneración dependen del tipo de material base utilizado para la producción del carbón activado. El carbón activa-

do se clasifica en dos tipos: en polvo y granular (3). La diferencia en las propiedades de los dos tipos de carbones se muestra en la Tabla 2.1.

Debido a las características de la estructura del carbón activado, se adsorben especialmente bien los compuestos aromáticos no polares y los compuestos de peso molecular de 10^2 - 10^4 g/mol, mientras que las macromoléculas de pesos moleculares altos no se adsorben bien ya que no pueden ingresar a los microporos (3). El tamaño de poros del carbón activado se muestra en la Tabla 2.2 y las principales aplicaciones del carbón activado en el tratamiento de aguas se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2. 1: Características del carbón activado

PROPIEDAD	CARBÓN	
	GRANULAR	POLVO
Tamaño de la partícula	0.5 – 4 mm	1 -100µm
Porosidad interna	300 – 1500 mm ³ /gr	
Área superficial	500 – 1500 m ² /gr	

Tabla 2. 2: Tamaño de los poros del carbón activado

ESTRUCTURA DEL CARBON	RADIO DE PORO
Macroporos	> 25 nm
Mesoporos	1nm < rp < 25nm
Microporos	< 1nm

La adsorción en carbón activado puede aplicarse en la eliminación de compuestos orgánicos del aire y del agua residual, como material soporte de biofiltros, en la eliminación de color de efluentes industriales y como catalizador.

2.3. Eliminación de sustancias inorgánicas por reacción química y catalítica en la superficie del carbón activado

Aunque en la mayoría de sus aplicaciones el carbón activado actúa como un adsorbente físico, también ocurren reacciones químicas de sustancias inorgánicas en la superficie del mismo. Algunas de estas reacciones han permitido aplicaciones de mucha utilidad, como es la eliminación de cloro (2).

2.4. Eliminación de cloro libre con carbón activado del agua potable

Una de las principales aplicaciones del carbón activado es la decloración o la eliminación de cloro libre del agua. Dicho compuesto no proviene de las fuentes naturales de abastecimiento, tales como pozos, ríos o lagos. Es un reactivo químico que se le agrega al agua, principalmente como desinfectante, y en ocasiones, para controlar olor y sabor, y controlar el crecimiento biológico o eliminar amoníaco (4). La decloración consiste en un mecanismo complicado que puede seguir distintos caminos de reacción en los que el carbón activado puede intervenir como reactivo o como catalizador (4).

El cloro libre puede adicionarse al agua en forma de cloro líquido, solución de hipoclorito de sodio, o tabletas de hipoclorito de calcio. En cualquiera de estos casos, el resultado es el mismo, quedando el cloro disuelto en forma de ácido hipocloroso (HOCl), un ácido débil que tiende a disociarse parcialmente, como se indica en la reacción [2.1] (4).



La distribución entre ácido hipocloroso e ión hipoclorito depende del pH y de la concentración de estas especies. A ambas formas moleculares se las define como cloro libre. Las dos son fuentes oxidantes que al ser adicionados al agua empiezan por reaccionar de manera casi inmediata con impurezas orgánicas e inorgánicas y susceptibles de oxidarse. El cloro que reacciona en esta etapa deja de ser libre y pasa a ser combinado. El cloro libre restante requiere de algún tiempo, que puede ir de unos cuantos segundos a varias horas, según su concentración, para ejercer un efecto biocida en los microorganismos. Se cree que la toxicidad del cloro libre radica en la reacción de éste con el sistema enzimático de las células atacando la pared celular (4).

Una vez terminada la etapa de desinfección, es necesario eliminar el cloro libre residual, no sólo porque es tóxico para el ser humano, sino porque imparte un mal olor y sabor al agua, interfiere con procesos industriales, daña a la mayoría de las resinas de intercamb-

bio iónico utilizadas en los suavizadores y en los desmineralizadores, y afecta a las membranas de ósmosis inversa (2).

2.5. Decloración del agua potable con filtros de carbón activado

2.5.1. Cinética del proceso de decloración

Aunque se han desarrollado varios procesos para disminuir los niveles de cloro libre en agua, la decloración en un lecho fijo de carbón activado ha sido la más rentable, y, por lo tanto, la más común. Se trata de un tanque cilíndrico vertical con una cama de carbón activado por la que se hace circular el agua.

Cuando el carbón se expone al cloro libre, se llevan a cabo reacciones en las que el ácido HOCl o el OCl^- se reducen a ión cloruro. Dicha reducción es el resultado de distintos caminos de reacción posibles. En los modelos de reacción más comunes, el carbón activado actúa como agente reductor, de acuerdo con las siguientes reacciones (4)



donde C^* representa los sitios activos del carbón activado.

C^*O y C^*O_2 son óxidos superficiales, que poco a poco van ocupando espacios, que al quedar bloqueados, ya no participan en la reacción. Algunos de estos óxidos se liberan hacia la solución como CO y CO_2 . Esto vuelve a dejar sitios activos disponibles para la adsorción, que por lo tanto, aumentan la capacidad del carbón activado para esta reacción de reducción. En cuanto al cloruro, este también se adsorbe en la superficie del carbón durante los primeros momentos de operación. Al seguir llegando HOCl u OCl^- a la superficie del carbón, la reacción se hace más lenta, como se puede ver en la Figura 2.1.

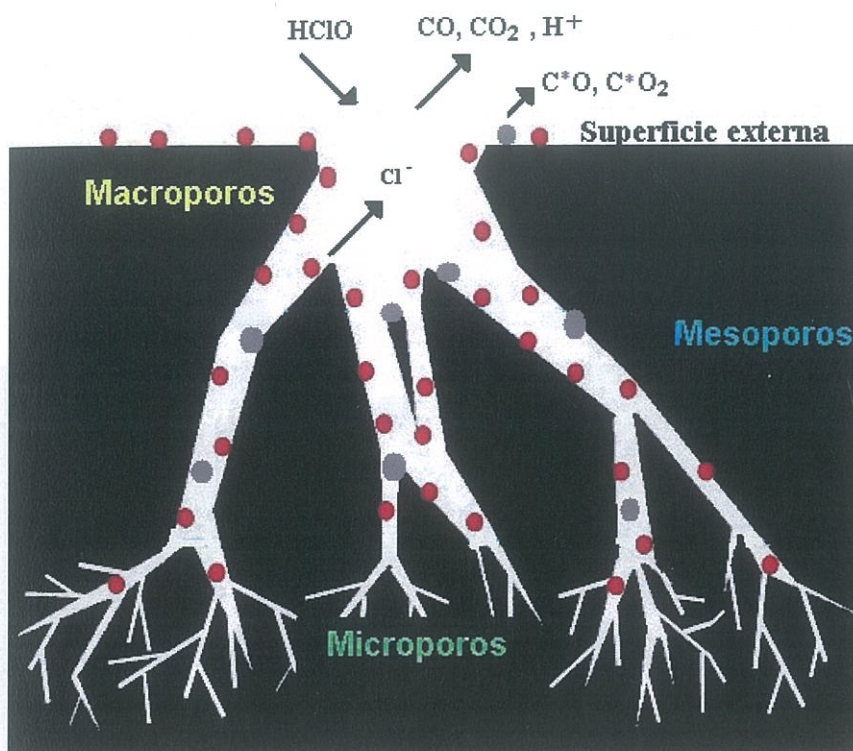


Figura 2. 1: Modelo de adsorción de cloro en el carbón activado

Debido a una limitación en la adsorción por cubrimiento total de los sitios activos en la superficie del carbón, empieza la desorción del cloruro. A este punto se lo llama punto o saturación de ruptura en la adsorción del cloro. La disminución de la velocidad de adsorción se debe a la acumulación de los óxidos en la superficie del carbón, esta acumulación se genera de manera gradual, lo que influye directamente en la capacidad de adsorción, que da como resultado la disminución de la capacidad de decloración del carbón activado (4).

La decloración es una operación compleja, en la que el carbón activado actúa como quimiadsorbente. Hay que aclarar que al mismo tiempo que el carbón activado actúa como declorador, adsorbe la materia orgánica presente en el agua en forma de fisisorción, bloqueando poros y sitios activos de quimisorción como se muestra en la Figura 2.1. Por lo tanto, a mayor contaminación orgánica, disminuye su tiempo de vida como declorador, y viceversa. También hay que mencionar que aún cuando el carbón siga eliminando todo el cloro libre, puede ya no estar reteniendo materia orgánica. Es

decir, termina antes su capacidad de adsorción física que su capacidad de dechlorar por adsorción química (4). Esto debido a que los poros del carbón activado se saturan por la presencia de materia orgánica.

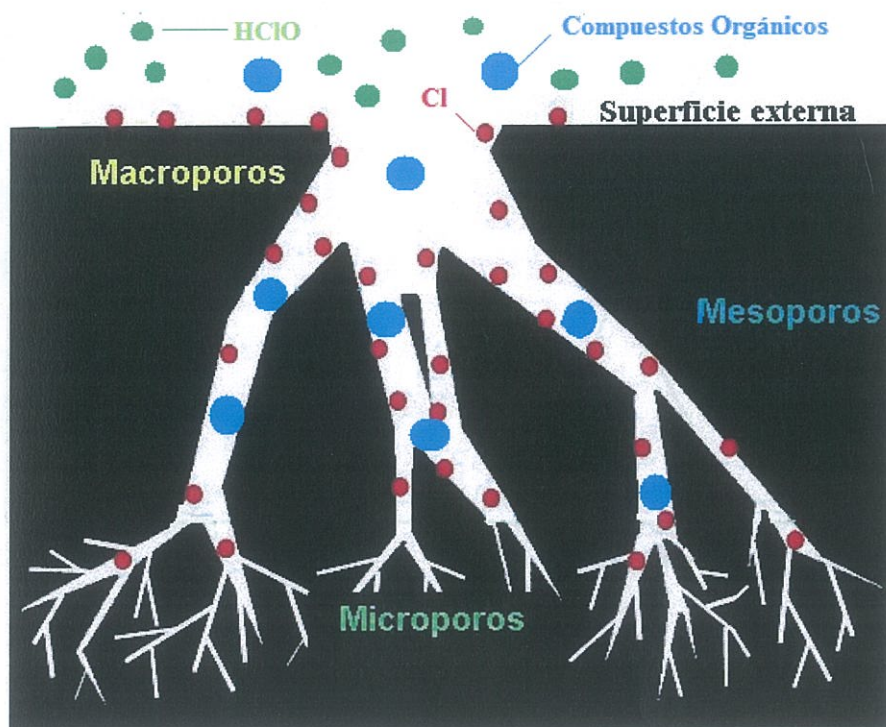


Figura 2. 2: Adsorción de materia orgánica en los sitios activos del carbón activado

La dechloración se ve afectada por varios factores, entre los que se puede mencionar:

Al disminuir el tamaño de partícula del carbón activado, la velocidad de difusión aumenta considerablemente, y por lo tanto la velocidad de dechloración. El uso del menor tamaño de partícula posible, es la manera más sencilla y eficaz de lograr el mayor aprovechamiento del carbón activado (4).

El pH del efluente controla la forma del cloro libre en el agua. Cuando su valor es de 7,6 la mitad del cloro libre está presente como HOCl y la otra mitad como OCl⁻. La reacción del HOCl con el carbón activado es mucho más rápida que la del OCl⁻. A un pH de 4,0 casi todo el cloro está en forma de HOCl y a un pH de 10,0 casi todo es OCl⁻ como se ve en la Figura. 2.2. Por lo tanto, mientras menor es el pH, la reacción es más

rápida, y el resultado es un mayor tiempo de operación antes de detectar cloro libre en el efluente (4).

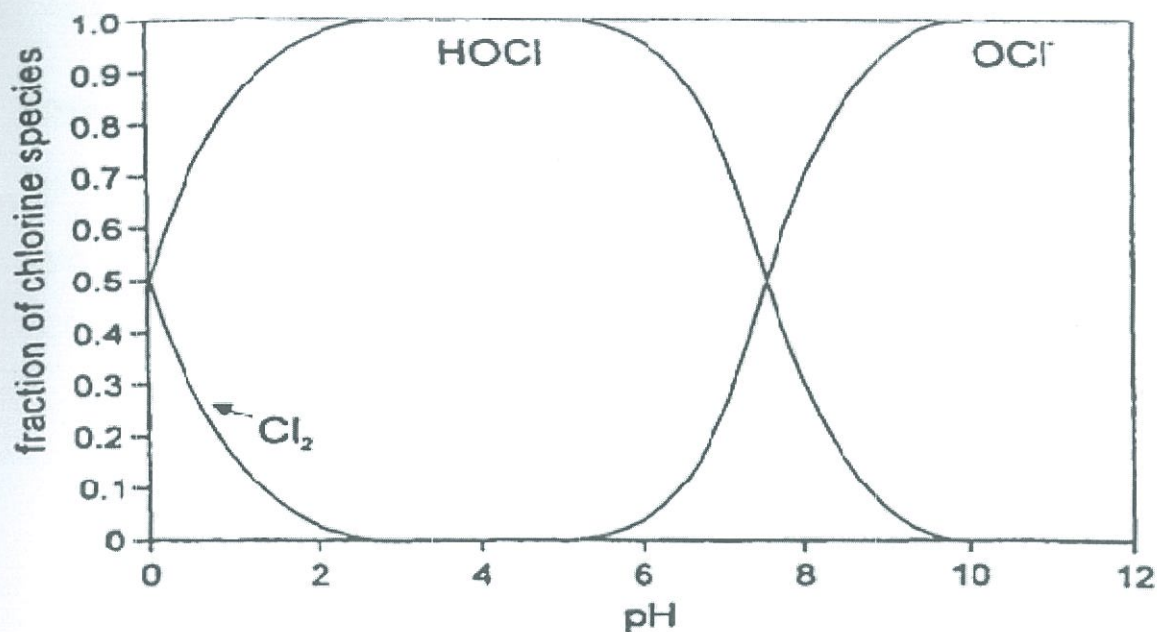


Figura 2. 3: Efecto del valor pH en la composición del cloro libre

La velocidad de deoloración aumenta al aumentar la temperatura, debido a que la viscosidad del agua disminuye, haciendo más rápida la difusión del cloro libre hacia la superficie del carbón activado (4). Al aumentar la concentración de cloro libre en el efluente, se satura el carbón activado en menor tiempo, ya que la capacidad de deoloración está determinada por el área superficial del carbón activado (4).

Independientemente del valor que puedan tener las distintas condiciones anteriores, el carbón activado tiene una alta capacidad de deoloración en relación con la de adsorción de contaminantes orgánicos, por lo tanto, es recomendable utilizar un tratamiento alternativo si se requiere la eliminación de compuestos orgánicos a la vez (4).

2.5.2. Curvas de ruptura y dimensionamiento de filtros de carbón activado

Cuando el agua fluye a través de una columna de carbón activado, los contaminantes se separarán gradualmente y el agua se va purificando progresivamente a lo largo del filtro.

Dentro del filtro se forma una zona de transición en la cual la concentración de contaminante varía desde un máximo, al inicio de la zona ($Z1$), hasta prácticamente cero en la parte final de la misma ($Z2$). Esta zona es la porción activa de la columna, y se denomina "zona de adsorción" como se muestra en las Figuras 2.4 a) y 2.4 c).

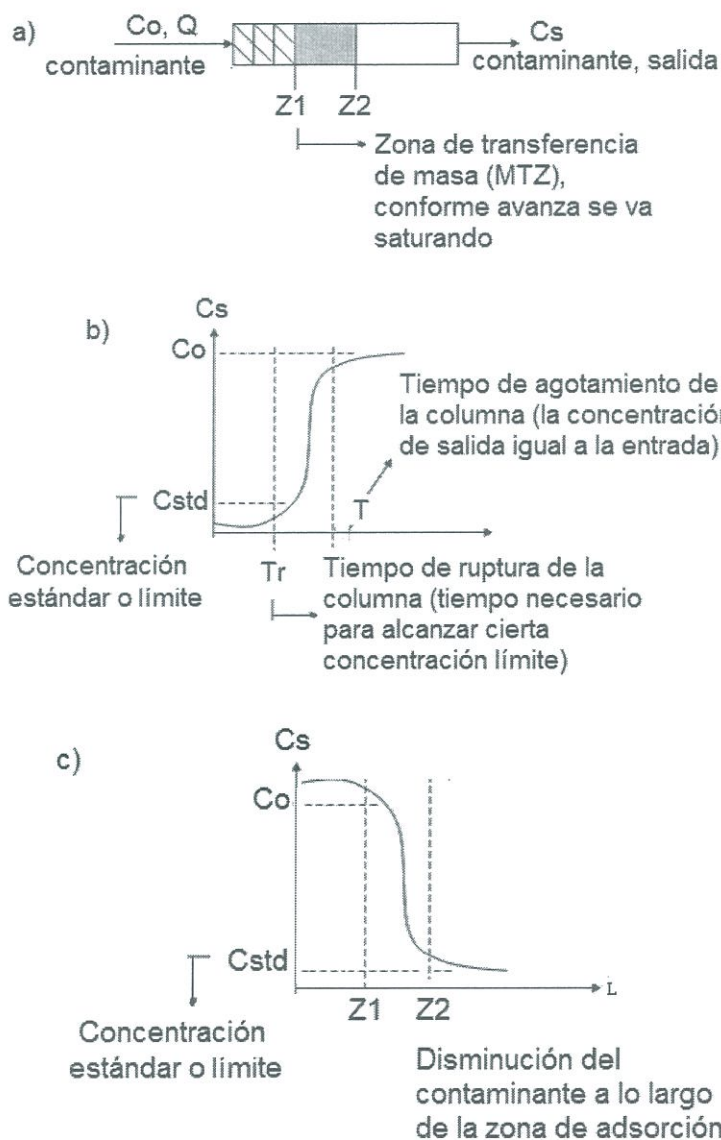


Figura 2. 4: Diagrama de las zonas de adsorción de un filtro de carbón activado

El movimiento de esta zona de adsorción puede verse mediante la representación de las curvas de ruptura, en donde el eje x corresponde al tiempo de operación. El tiempo de operación se verá afectado directamente por el volumen del filtro, ya que al variar el volumen del filtro se varía el tiempo de residencia y por ende el tiempo de operación se verá afectado. Normalmente, la operación de una columna de adsorción no se prolonga hasta su agotamiento. En el caso del filtro de carbón activado para la remoción de cloro, esto es necesario, ya que el incremento en la concentración de cloro se traduce en la falla del proceso de desmineralización, que es el proceso siguiente al que será sometida el agua tratada, además la columna desmineralizadora, contiene resinas que son altamente sensibles al cloro, por su carácter catiónico. Para determinar el tiempo de operación máximo permitido antes de alcanzar la ruptura se puede parar la operación cuando la concentración del efluente alcanza un valor dado. Esta concentración se denomina concentración de ruptura (C_e).

La única forma segura de diseñar un sistema de adsorción con carbón activado es llevar a cabo ensayos a escala semipiloto en columna bajo condiciones similares a las de operación a escala real y realizar un scale up para determinar el tiempo de operación permitido antes de tener la ruptura de la adsorción. Para realizar el dimensionamiento se considera una columna de adsorción de carbón activado a la que se alimenta agua a tratar, con una concentración de soluto C_0 , (mg/l) y con un tiempo de residencia del agua τ . Se desea reducir la concentración hasta un valor igual o inferior a C_e (mg/l), Al comienzo de la operación la concentración del efluente es menor que la concentración permisible C_e . Transcurrido un tiempo (t) se alcanza la concentración C_e correspondiente al punto de ruptura. Este punto, en el que se define tanto la concentración como el tiempo de ruptura, varía según varíe el caudal de agua, ya que el tiempo de residencia, es el que define el tiempo de operación.

2.6. Características del filtro de carbón activado

Dependiendo de la aplicación y de los compuestos orgánicos presentes en el agua, García (2) plantea que el tiempo de contacto entre el agua y el carbón activado que se requiere para su remoción, es conocido como EBCT (Empty Bed Contact Time) y se calcula con la siguiente ecuación:

$$EBCT = 0,9997 * V / Q \quad [2.4]$$

donde: V, es el volumen aparente del lecho de carbón [L]

Q el flujo del agua [L/min]

0,9997 es un factor de multiplicación

Para poder armar el filtro se debe tomar en cuenta lo siguiente: la geometría de filtro es importante para obtener un adecuado contacto entre el agua y la cama de carbón activado, siendo siempre conveniente que la altura de la cama de carbón sea al menos de 2 veces el diámetro de la misma (5).

Aunque es posible reactivar parcialmente la capacidad del carbón para absorber cloro libre, los compuestos no volátiles presentes en el agua no son fácilmente removibles. Por esta razón el filtro debe estar diseñado de tal forma que permita hacer lavados en contracorriente, que hacen que las capas inferiores del filtro se encuentren periódicamente en contacto con agua de red que contiene cloro, evitando de esta forma, contaminación del filtro en las zonas que estarán en contacto con agua de muy bajo contenido de cloro (5).

Ya que las capas inferiores de la cama están en contacto con muy poco cloro, se recomienda reemplazar la cama de carbón con una frecuencia de aproximadamente 6 meses

(6) para evitar la formación de biofilms que puedan traducirse en la contaminación biológica del lecho de carbón activado.

Utilizar tiempos de contacto no mayores a 10 minutos ya que aunque un mayor tiempo de contacto favorece la eliminación de compuestos clorados orgánicos, la capacidad de eliminar Cl_2 libre disminuye a partir de ese valor (6).

2.7. Procesos de sanitización y mantenimiento del filtro de carbón activado

El hecho de eliminar el cloro del agua hace que esta sea susceptible a la invasión de microorganismos. Como las capas superiores del lecho eliminan el cloro del agua, las capas más bajas, ricas en nutrientes y que no están expuestas al cloro, están expuestas a proliferación orgánica. Esto hace que los lechos de carbón sean potenciales fuentes de contaminación orgánica y contaminación por pirógenos (7). El uso de los lechos de carbón requiere, por lo tanto, de medios para sanitizarlos. El control efectivo de la proliferación de microorganismos en los lechos de carbón es difícil y costoso. Y actualmente no existe una vía completamente satisfactoria para controlar el desarrollo microbiano. La sanitización periódica con agua caliente ($90\text{ }^{\circ}\text{C}$) es una práctica aceptable. Mientras que el vaporizado del lecho de carbón es considerado generalmente como el mejor método de sanitizarlo. Esto depende del material de la carcasa que contiene el carbón, ya que esta debe ser capaz de soportar el vapor (7).

3. Métodos Experimentales

3.1. Caracterización de los tres tipos de carbón activado

Tabla 3.1: Características de los tres tipos de carbón activado

Características	Ecuacarbones	Ecuacarbones	LIFE
Origen de la materia prima	Cáscara de coco	Cáscara de coco	Fósil
Tipo de activación	Física	Física	Física
Área Superficial (m ² /g)	1197	700	1396
Volumen medio de poro (cm ³ /g)	0,693	0,190	0,743
Volumen de microporos (cm ³ /g)	0,43	0,163	0,640
Densidad aparente (g/cm ³)	0,56	0,52	0,58
Tamaño de malla	12x20	8x20	8x20
Número de yodo (mg l/g)	900	700	1300

3.2. Determinación de la relación óptima agua-carbón activado

Utilizando diferentes tipos de carbón activado se prosiguió a determinar la relación óptima agua-carbón activado. Con estos datos se realizarán los cálculos para determinar la cantidad de carbón que debe utilizarse en el filtro y con qué caudal se debe trabajar.

Los pesos de carbón activado y el volumen de agua en cada muestra se tomaron para lograr las siguientes relaciones agua - carbón: 5:1, 15:1, 20:1, 25:1, 30:1, 40:1, 50:1, 60:1, 75:1, 80:1 y 120:1.

Las muestras se colocaron en frascos de vidrio y se dejaron en agitación por 30 minutos.

Cada muestra se realizó por triplicado.

Una vez transcurridos los 30 minutos, se filtró cada una de las muestras con ayuda de embudos y papel filtro.

3.3. Análisis de cloro libre

Para determinar el contenido de cloro residual, tanto libre como combinado, se puede utilizar el método colorimétrico que trabaja con DPD (N, N-dietil-p-fenilendiamonio) como su reactivo, adecuado para concentraciones de cloro residual entre 0,1 y 4 mg/l o ppm.

El DPD provoca una oxidación del cloro, que cambia el color de la muestra. La cantidad de cloro en el agua hace que el color cambie a magenta. La intensidad del color es directamente proporcional a la concentración de cloro determinado en el colorímetro.

Cada muestra, se analiza con un colorímetro DC 1600 siguiendo el siguiente procedimiento: se toma 10 ml de la muestra a analizar y se la coloca en los tubos 0967. Se selecciona 4 en la perilla "select wavelength", se introduce el tubo, se coloca la tapa, se presiona "30 second read" y se fija el valor en 100 con la perilla "set Blank". Después se saca el tubo y se adiciona una pastilla del reactivo DPD#1, se agita la muestra hasta la completa disolución de la pastilla. Esto produce un cambio en la coloración de la muestra, que depende de la concentración de cloro presente en la misma, tal como se puede apreciar en la Figura 3.1.

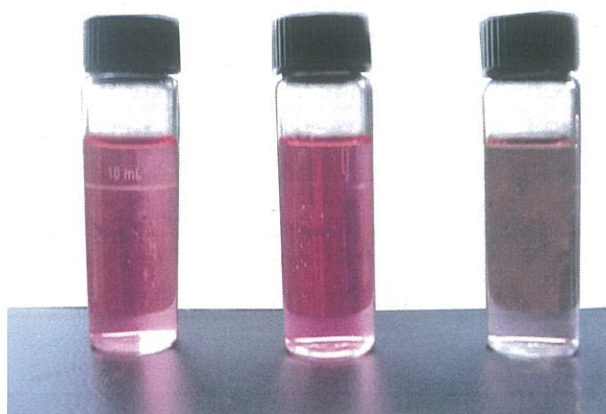


Figura 3. 1: Cambio en la coloración de la muestra según la concentración de cloro presente

Una vez realizado esto se introduce nuevamente el tubo, se coloca la tapa y se presiona "30 second read". Se toma el valor indicado y se lo relaciona con la concentración de cloro indicado en la tabla de equivalencia.

3.4. Dimensionamiento, construcción y puesta en marcha del filtro de carbón activado

3.4.1. Dimensionamiento del filtro

La capacidad del carbón activado para declorinar agua normalmente se expresa mediante el valor medio (VM). El VM representa la altura de una columna de carbón necesaria para reducir el contenido original de cloro en un 50 % y es una medida de la relación declorinante de un carbón activado (3).

Los cálculos realizados se basan en la relación óptima agua-carbón activado.

Utilizando una hoja de cálculo del programa Excel, se obtiene el caudal óptimo de trabajo por gramo de carbón activado. Para estos cálculos se utilizan los datos obtenidos de los experimentos realizados para obtener la relación óptima agua-carbón activado durante el desarrollo de este estudio y el dato de la literatura referente al VM. Estos datos se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3. 2: Datos referentes al valor medio y a la relación óptima agua-carbón activado

Tiempo de contacto (min)	15
Porcentaje de Remoción	50
Cantidad de agua optima (ml)	50
Cantidad de carbón activado óptima(gr)	1,0
Caudal óptimo por gramo de carbón activado (ml/min gr CA)	3,3

Para el cálculo del caudal óptimo se plantea las siguientes ecuaciones:

$$\text{Masa de carbón [gr]} = \frac{\dot{V}_{\text{conocido}}}{\dot{V}_{\text{óptimo}}} \quad [3.1]$$

$$\dot{V}_{\text{Calculado}} [\text{cm}^3 / \text{min}] = \frac{\text{Masa de Carbón}_{\text{conocida}}}{\dot{V}_{\text{óptimo}}} \quad [3.2]$$

donde: \dot{V} es el caudal de agua

Estas relaciones se utilizan para calcular el caudal de operación requerido conociendo el valor de la cantidad de carbón a utilizarse o la cantidad de carbón requerida conociendo el caudal con el que se quiere trabajar. El volumen del filtro se determinó experimentalmente, los análisis inician con una cantidad de carbón activado de 120 g acorde con los datos obtenidos de los cálculos posteriores. Estos 120 g de carbón activado fueron colocados dentro de tubos de 2, 3 y 6 pulgadas de diámetro (que equivalen a: 5.08, 7.62 y 15.24 centímetros respectivamente), y se tomó las medidas de la altura de la cama de carbón obtenida en cada tubo. Con esto se logró determinar que una altura de lecho del doble del valor del diámetro del tubo, para esa cantidad de carbón era el tubo de 2 pulgadas (5.08 cm) de diámetro.

3.4.2. Construcción del filtro

El filtro se construyó con un tubo de hierro galvanizado de 15 cm de largo y 2 pulgadas de diámetro. Se adaptó al filtro dos tapas de hierro galvanizado una en la parte superior y una en la parte inferior, cada una de las cuales tiene una salida de ½ pulgada a la cual se adapta una manguera. El filtro se hermetizó con ayuda de teflón y de sellador IPS plus. En la parte inferior del tubo y en la tapa superior, se soldó malla de acero colocada de tal forma que las aperturas no sean mayores a 2 mm, esto como soporte para la cama

de carbón. El filtro cuenta con un Rotámetro MPB, necesario para determinar el caudal de trabajo. Las adaptaciones del rotámetro al filtro y la conexión al grifo de agua, de donde se va a tomar el agua potable para el tratamiento, se lograron con neoprenos de $\frac{3}{4}$ a $\frac{1}{2}$ pulgada, a los cuales se adaptó uniones de $\frac{1}{2}$ pulgada para lograr la adaptación de las mangueras. Todas estas uniones también fueron selladas con teflón y el sellador IPS plus. El filtro se colocó en un soporte universal y con ayuda de pinzas, colocadas en las uniones de las tapas con las mangueras, se mantuvo en posición como se muestra en la Figura 3.2.



Figura 3. 2: Filtro de carbón activado con rotámetro

3.4.3. Puesta en marcha y toma de muestras

La toma de muestras inicia desde el instante en que sale el primer efluente del filtro y esa muestra será considerada la muestra a tiempo cero, las siguientes muestras se tomarán cada hora, hasta que el lecho de carbón activado llegue a la saturación, que se verá determinada por la cantidad de cloro que logre remover.

Para dosificar el caudal a través del filtro de carbón activado, se utilizó un rotámetro MPB de 800 cm³/min de capacidad máxima que se muestra en la Figura 3.3. Se requirió de una calibración previa para determinar el caudal real que proporciona. Esto se realizó con ayuda de una probeta y un cronómetro. Lo que se hizo fue determinar el tiempo que se demoraba en recolectar un cierto volumen en cada uno de los puntos de medida que tiene el rotámetro.



Figura 3. 3: Rotámetro MPB

La curva de calibración que se encuentra en la Figura 3.3, muestra que la relación es: caudal real = caudal nominal * 1.06, con un R^2 de 0.9989, lo cual indica que el caudal real se acerca al caudal nominal dentro del rango adecuado de tolerancia $\pm 6\%$

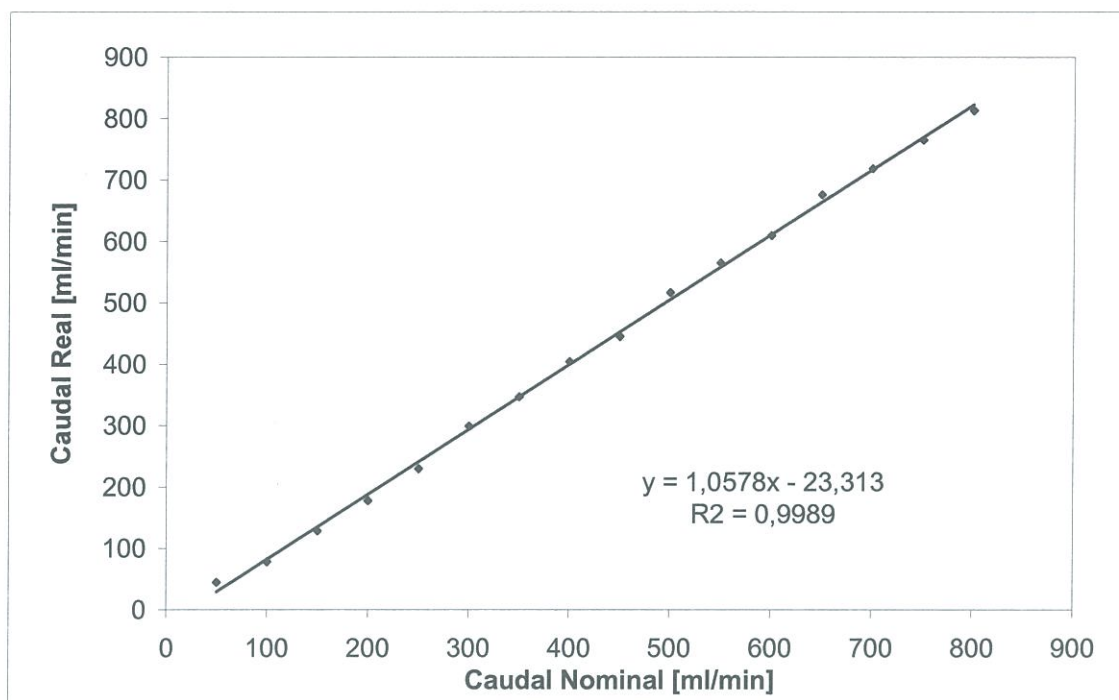


Figura 3. 4: Curva de calibración del rotámetro

3.5. Determinación de las curvas de ruptura

3.5.1. Curvas de ruptura del filtro de carbón activado

El cambio de la cantidad de cloro con el transcurso del tiempo, es analizado con el método colorimétrico del DPD, descrito en el capítulo 3.1. Estos datos se utilizarán para realizar las curvas de ruptura que permiten conocer el momento en el que el lecho de carbón está saturado y necesita su regeneración, así como el tiempo de operación del mismo en base a la eficiencia en la remoción de cloro.

Este procedimiento se realiza con los dos tipos de carbón activado de mejor desempeño durante la investigación de la relación óptima agua – carbón activado. Estos son un carbón de malla 12 x 20, provisto por la empresa ECUACARBONES y otro de malla 8

x 20 provisto por una empresa privada y que además es la proveedora de Laboratorios LIFE.

Cada uno de los carbones será sometido a una variación en el caudal manteniendo la misma cantidad de carbón. Los caudales se variarán entre 200 cm³/min, 400 cm³/min, 600 cm³/min y 800 cm³/min, para así determinar cual es la relación óptima de trabajo.

3.5.2. Curvas de ruptura para una mezcla arena-carbón activado

El proceso a realizarse para caracterizar la curva de ruptura de un lecho de arena y carbón activado es el mismo que el descrito anteriormente. En este proceso el lecho dentro del filtro va a tener una composición de 50% arena y 50% carbón activado.

3.6. Análisis de la eliminación de cloro por evaporación

En un vaso de precipitación abierto de 2000 ml se colocará una muestra de agua con una cantidad de cloro determinada. Esta muestra se dejará en reposo por 24 horas, se analizará la cantidad de cloro presente cada 2 horas para determinar la velocidad de evaporación de cloro por reposo.

3.7. Reactivación del carbón activado y determinación del tiempo de vida útil

Para determinar el tiempo de vida útil del carbón activado es preciso realizar experimentos de reactivación del carbón. Para esto se hace un tratamiento técnico del carbón activado después de que este haya alcanzado su punto de ruptura.

El carbón activado utilizado para la determinación de la curva de ruptura con el caudal óptimo, se coloca en bandejas de aluminio, en una estufa a 110 °C por 24 horas. Posteriormente se realiza una nueva curva de ruptura utilizando el mismo caudal de agua. Se mide nuevamente el porcentaje de remoción de cloro y el tiempo de ruptura. Si no existe variación en la curva de ruptura se repetirá el proceso de reactivación, hasta que el

carbón activado empeore en su comportamiento de remoción de cloro con lo que se determinará el tiempo de vida útil del lecho de carbón activado en el filtro.

3.8. Determinación de la velocidad de reacción para la deoloración de agua con carbón activado

La dependencia de la velocidad de reacción con las concentraciones de los reactivos presentes se determina por observación experimental (8). Esta dependencia y su relación se expresan mediante el orden de reacción, que es el exponente al cual están elevadas las concentraciones de los reactivos en la ecuación de la ley de la velocidad (8).

La determinación de los parámetros de ley de velocidad se efectúa midiendo la concentración del reactivo en cuestión en función del tiempo y utilizando después métodos de análisis de datos, para determinar el orden de reacción y la constante de velocidad de reacción específica, k (8).

Cuando la reacción es irreversible se puede determinar el orden de reacción y la constante de velocidad diferenciando numéricamente los datos de concentración contra tiempo, este método, llamado el método diferencial de análisis de velocidad, puede aplicarse cuando la velocidad es esencialmente función de la concentración de un solo reactivo (8). Para desarrollar este método se parte de la definición de la velocidad de reacción y de un término cinético en forma de ley de potencia para un reactor de volumen constante (8)

$$-r = \frac{dC_A}{dt} = k_A C_A^\alpha \quad [3.3]$$

Donde: α : orden de reacción

C_A : concentración de cloro

K_A : constante de velocidad de reacción específica

Después de sacar el logaritmo natural de ambos miembros de la ecuación 3.3

$$\ln\left(-\frac{dC_A}{dt}\right) = \ln k_A + \alpha \ln C_A \quad [3.4]$$

Experimentalmente se obtiene los valores de $\ln(-dC_A/dt)$ para diferentes valores de $\ln C_A$. La pendiente de la gráfica de $\ln(-dC_A/dt)$ en función de $\ln C_A$ es el orden de reacción.

Para determinar el orden de reacción por el método integral de análisis de datos de velocidad, se supone el orden de la reacción y se integra la ecuación diferencial que se usa para modelar el sistema. Si el orden supuesto es correcto, la gráfica apropiada de los datos concentración-tiempo será lineal (8). Este método se lo utiliza con mayor frecuencia cuando se conoce el orden de reacción y lo que se quiere es determinar la constante de velocidad (8).

Ambos métodos serán utilizados con el fin de determinar el orden de reacción y la ley de velocidad de reacción.

3.9. Determinación del sistema de control

Una vez determinada la ecuación cinética con sus parámetros, el orden de reacción y la constante de velocidad de reacción específica, se realiza los cálculos necesarios para obtener la ecuación de control para un Reactor Tubular (PFR), ya que en un reactor tubular, los reactivos se consumen continuamente a medida que fluyen a lo largo del reactor (8), y este es el comportamiento que tiene el cloro en el flujo del agua que pasa por el lecho de carbón activado.

Una vez obtenidas las ecuaciones del sistema, se comparan las variables de salida con los datos de concentración experimental obtenidos al realizar la curva de ruptura para un caudal de $600 \text{ cm}^3/\text{min}$ y se extrapola para otros caudales.

4. Resultados y Discusión

A continuación se presentan los resultados de los análisis experimentales realizados a lo largo de este estudio. Primero se presentan los resultados de la determinación óptima de la relación óptima agua-carbón activado. Estos experimentos se realizaron utilizando un carbón de malla 12 x 20, otro de malla 8x20, provistos por la empresa ECUACARBONES y otro de malla 8 x 20 provisto por una empresa privada y que además es la proveedora de Laboratorios LIFE. Estos experimentos se realizaron utilizando diferentes tipos de carbón activado y se determinó la relación óptima agua-carbón activado, con estos datos se realizan los cálculos para determinar la cantidad de carbón que debe utilizarse en el filtro y con que caudal se debe trabajar.

Se presentan los datos para determinar las curvas de ruptura para un lecho de carbón activado, estas permiten conocer el momento en el que el lecho de carbón está saturado y necesita su regeneración, así como el tiempo de operación del mismo en base a la eficiencia en la remoción de cloro. Cada uno de los carbones será sometido a una variación en el caudal manteniendo la misma cantidad de carbón. Los caudales se variarán entre 200 cm³/min, 400 cm³/min, 600 cm³/min y 800 cm³/min, para así determinar cual es la relación óptima de trabajo.

Los datos para caracterizar la curva de ruptura de un lecho de arena y carbón activado también están presentes. En este proceso el lecho dentro del filtro va a tener una composición de 50% arena y 50% carbón activado.

Los resultados de la remoción de cloro por evaporación también se encuentran detallados, la muestra de agua se dejó en reposo por 24 horas, tomando muestras cada 2 horas para conocer la eliminación de cloro por evaporación.

El carbón activado fue sometido a un proceso de regeneración, en el cual la muestra estuvo en una estufa a 110 °C por 24 horas, tiempo después del cual se caracterizó una

nueva curva de ruptura, en la que se determinó el porcentaje de remoción y el tiempo de ruptura, si no existen cambios notables con la curva original el proceso de regeneración se repite nuevamente, hasta que el carbón decaiga en el proceso de deoloración.

La determinación del orden de reacción y de la constante de reacción específica, se encuentran detallados, fueron calculados experimentalmente con el método diferencial de análisis de velocidad y con el método integral de análisis de velocidad, para con estos datos poder encontrar la ley de la velocidad de reacción con todos sus parámetros, lo que permitirá la determinación del sistema de control para el filtro de carbón activado.

4.1. Determinación de la relación óptima agua-carbón activado

Se analizó el porcentaje de remoción de cloro en diferentes tipos de carbón activado, para poder determinar la relación óptima agua- carbón activado.

Los análisis se realizaron por triplicado y los datos de estos experimentos se encuentran detallados en el anexo B.2.

En base a los datos presentados en la Figura 4.1 para los tres tipos de carbón activado se determinó que carbones se utilizarán para poner en marcha el filtro.

En base a estos datos se concluye que los análisis de las curvas de ruptura se realizarán con el carbón de Ecuacarbones 12x20 y con el carbón de LIFE, esto debido a que los dos carbones tienen un porcentaje de remoción máximo de cloro del 98%, es decir la cantidad de cloro residual en el agua es de 0,02 ppm y es el valor mínimo alcanzado. El máximo en la remoción se da para la relación agua-carbón activado de 50 a 1 para los dos carbones. Mientras que el carbón de Ecuacarbones 8x20 tiene un porcentaje de remoción máximo de cloro del 97%, concentración de cloro residual 0,03 ppm con una relación 15 a 1.

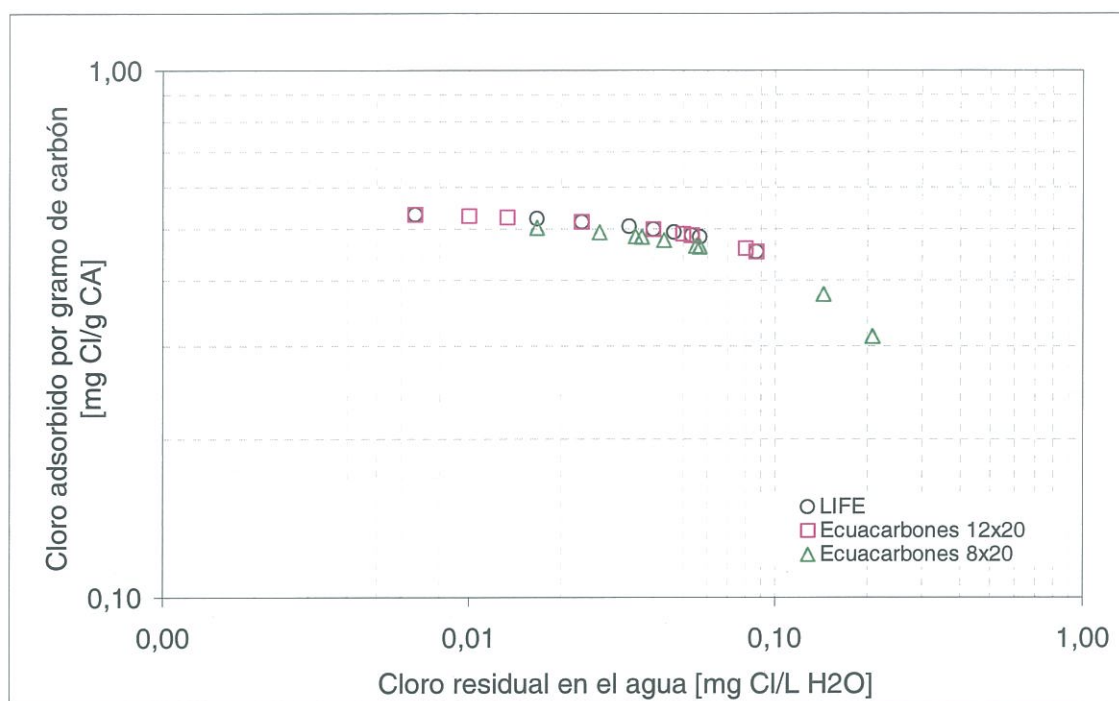


Figura 4.1: Isotermas de adsorción para los tres tipos de carbones

Los carbones escogidos, el 12x20 de Ecuacarbones y el de 8x20 de LIFE, tienen un porcentaje de remoción mayor con un mayor volumen de agua tratado, utilizando una cantidad de carbón pequeña, lo que se traduce en mayor eficiencia en relación con la utilización de una menor cantidad de carbón.

4.2. Determinación de las curvas de ruptura

4.2.1. Curvas de ruptura del filtro de carbón activado

Utilizando la hoja de cálculo del programa Excel descrita en el capítulo 3.3, en la que se utiliza los datos obtenidos de los experimentos realizados para obtener la relación óptima agua-carbón activado tomando en cuenta el criterio teórico del valor medio, que es el valor que se necesita para que la remoción de cloro sea del 50%, como se muestra en la Tabla 3.1. Se obtiene el caudal óptimo de trabajo por gramo de carbón activado.

Y se lo utiliza para calcular el caudal de operación conociendo el valor de la cantidad de carbón a utilizarse o la cantidad de carbón conociendo el caudal con el que se quiere trabajar, datos que se muestran en la Tabla 3.2.

A partir de estos cálculos se escogió empezar el análisis con un caudal de $400 \text{ cm}^3/\text{min}$ con una cantidad de carbón de 120 g, que además da una altura de lecho de 11 cm. Esta altura es aproximadamente el doble del diámetro del tubo, que es de 5.08 cm. Para tener una relación altura del lecho/ diámetro de 2 a 1 el lecho de carbón debería tener 10,16 cm de altura.

Una vez puesto en marcha el filtro de carbón activado con el lecho deseado, se realizaron mediciones de la cantidad de cloro presente en el agua antes y después del filtro cada hora.

El filtro se puso en marcha una vez que se calculó el caudal real que estaba midiendo el rotámetro, tomando en cuenta los datos de la calibración del rotámetro, que permitieron determinar que la relación es caudal real = caudal nominal*1.06. Para los $400 \text{ cm}^3/\text{min}$ el caudal real es de $404,3 \text{ cm}^3/\text{min}$ que es un valor que está dentro del 1% de tolerancia.

Los datos de calibración del rotámetro se encuentran detallados en el anexo B.1.

El tiempo de operación del filtro en los diferentes experimentos fue escogido de tal forma que la remoción de cloro sea cercana a cero.

Los experimentos de la curva de ruptura se realizaron primero con el carbón activado 12x20 de Ecuacarbones.

Se realizaron las curvas de ruptura para tres caudales diferentes: $200 \text{ cm}^3/\text{min}$, $400 \text{ cm}^3/\text{min}$ y $800 \text{ cm}^3/\text{min}$. Los datos experimentales obtenidos se encuentran detallados en el anexo B.3.1.

Para un caudal de $400 \text{ cm}^3/\text{min}$ el tiempo de trabajo del filtro fue de 12 horas, con un porcentaje de remoción máximo del 87.9%. El filtro alcanza el equilibrio, es decir la concentración de cloro se mantiene constante en el mínimo a las 5 horas de trabajo y durante 3 horas, datos presentes en la Figura 4.2.a

Si tomamos en cuenta los datos de la Figura 4.2.a, para un caudal de $800 \text{ cm}^3/\text{min}$, la remoción de cloro es baja e ineficiente, el porcentaje de remoción máxima para este caudal es del 75.8%, en un tiempo de operación total de 6 horas, en el cual se trató el mismo volumen de agua después de 12 horas que con $400 \text{ cm}^3/\text{min}$. Se alcanzó el equilibrio al poco momento de iniciar la filtración pero los niveles de concentración de cloro se mantienen bajos por un lapso de tiempo de 2 horas, lo cual es un tiempo de remoción muy corto.

Ahora los datos de la Figura 4.2.a con respecto al caudal de $200 \text{ cm}^3/\text{min}$ muestran que para tratar el mismo volumen de agua, el filtro tiene que operar durante 24 horas. El equilibrio se alcanza inmediatamente y el periodo de equilibrio (concentración de cloro mínima) se mantiene por un lapso de 8 horas. Para este caudal el porcentaje de remoción es del 93,9%.

Durante el tiempo de operación del filtro a los diferentes caudales, se trataron 288 L de agua y se removieron 170 mg de cloro en total, estos datos del filtro hasta alcanzar el equilibrio, durante el equilibrio y después del equilibrio de cada uno de los caudales se presentan en la Tabla 4.1.

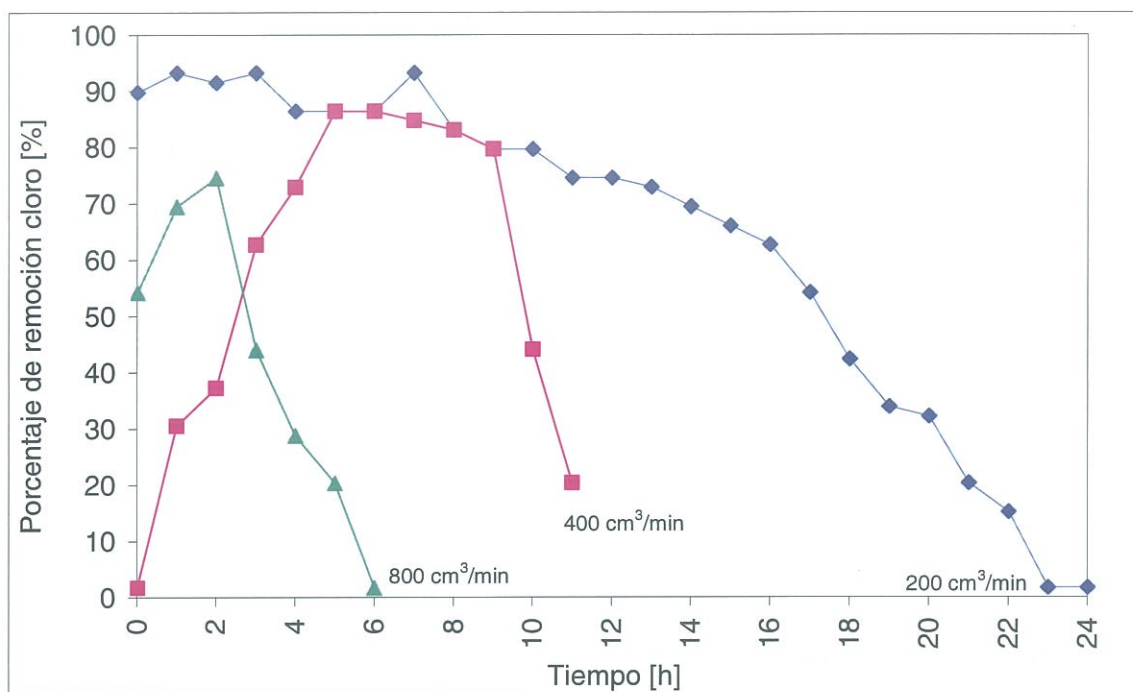


Figura 4.2 a: Curvas de ruptura carbón activado Ecuacarbones 12x20, comparando porcentaje de remoción de cloro con respecto al tiempo

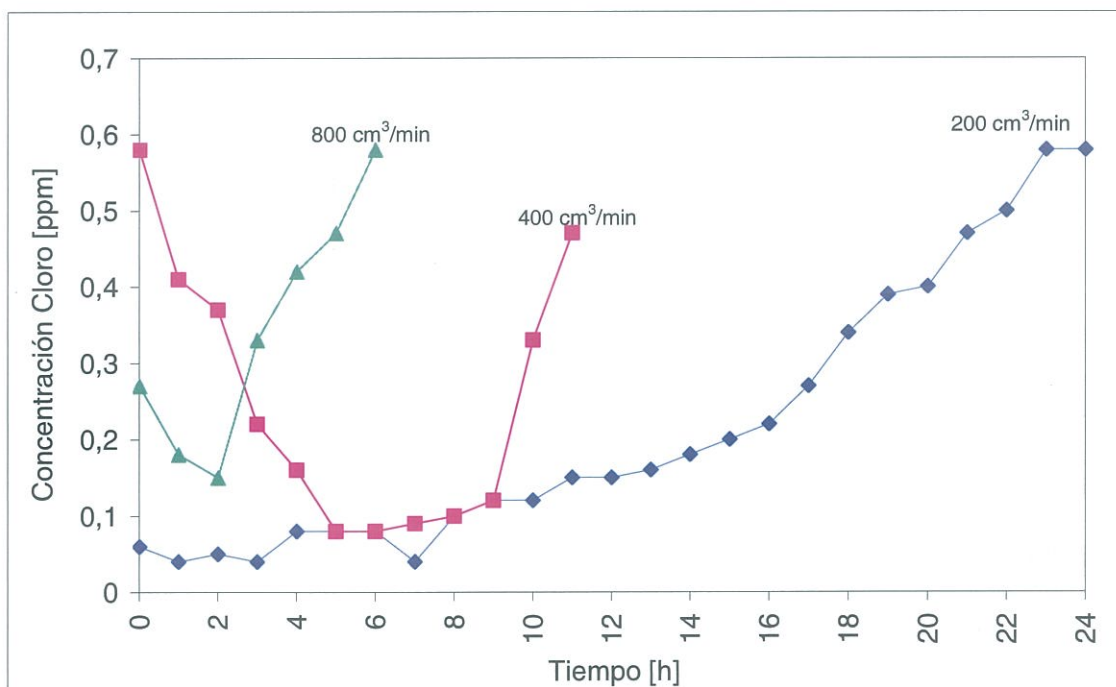


Figura 4.2 b: Curvas de ruptura carbón activado Ecuacarbones 12x20, comparando concentración de cloro con respecto al tiempo

Tabla 4. 1: Datos curva de ruptura lecho de carbón activado, 200, 400 y 800 cm³/ min, carbón 12x20 Ecuacarbones

	Hasta alcanzar equilibrio	Equilibrio	Después del equilibrio	Total
Cantidad de agua tratada (L) 200 cm ³ /min	12	96	180	288
Cantidad de cloro removido (mg) 200 cm ³ /min	7	57	106	170
Tiempo de operación (h)	1	8	15	24
Cantidad de agua tratada (L) 400 cm ³ /min	120	72	96	288
Cantidad de cloro removido (mg) 400 cm ³ /min	71	42	57	170
Tiempo de operación (h)	5	3	4	12
Cantidad de agua tratada (L) 800 cm ³ /min	48	96	144	288
Cantidad de cloro removido (mg) 800 cm ³ /min	28	57	85	170
Tiempo de operación (h)	1	2	3	6

La muestra de carbón otorgada por LIFE es de un tamaño de malla mucho menor al del carbón de Ecuacarbones, sin embargo los 11 cm de altura se alcanzaron con 120 g del carbón al igual que con el carbón anterior.

Para el análisis de la curva de ruptura con el carbón activado de LIFE se trabajó con caudales de 200 cm³/min, 400 cm³/min, 600 cm³/min y 800 cm³/min. Los datos de estos análisis están detallados en el anexo B.3.1.

Analizando los datos del Figura 4.3.a, se observa que: para un caudal de 400 cm³/min, el tiempo de operación es de 16 horas y se trata 384 L de agua. La concentración mínima de cloro en el efluente se alcanza a las 8 horas de trabajo, que es el tiempo que se demora en alcanzar el equilibrio y lograr mantener una concentración de cloro mínima constante, por 3 horas. El porcentaje de remoción máximo para este caudal es del 85,2%.

Para un caudal de $800 \text{ cm}^3/\text{min}$, se puede observar que la remoción de cloro es deficiente, con un porcentaje de remoción del 73.5%. El equilibrio del sistema se alcanza a las 2 horas de trabajo y la concentración de cloro se mantiene en su mínimo valor por un lapso de 3 horas. El tiempo de operación es de 8 horas.

Para un caudal de $600 \text{ cm}^3/\text{min}$, la remoción de cloro no alcanza los niveles esperados. Se tiene un porcentaje de remoción del 76.5%, y el sistema alcanza un equilibrio a las 4 horas de trabajo. La concentración de cloro se mantiene en su mínimo valor por un lapso de 3 horas, con un tiempo de operación total de 10 horas.

Con un caudal de $200 \text{ cm}^3/\text{min}$, se puede notar que el equilibrio se alcanza inmediatamente y que la remoción de cloro es realmente efectiva, su porcentaje de remoción es del 96.9% y se mantiene por un lapso de 20 horas y tiene un tiempo de operación total de 32 horas.

Durante el tiempo de operación del filtro a los diferentes caudales, se trataron un total de 384 L de agua y se removieron 227 mg de cloro en total, los datos del filtro hasta alcanzar el equilibrio, durante el equilibrio y después del equilibrio de cada uno de los caudales se presentan en la Tabla 4.2.

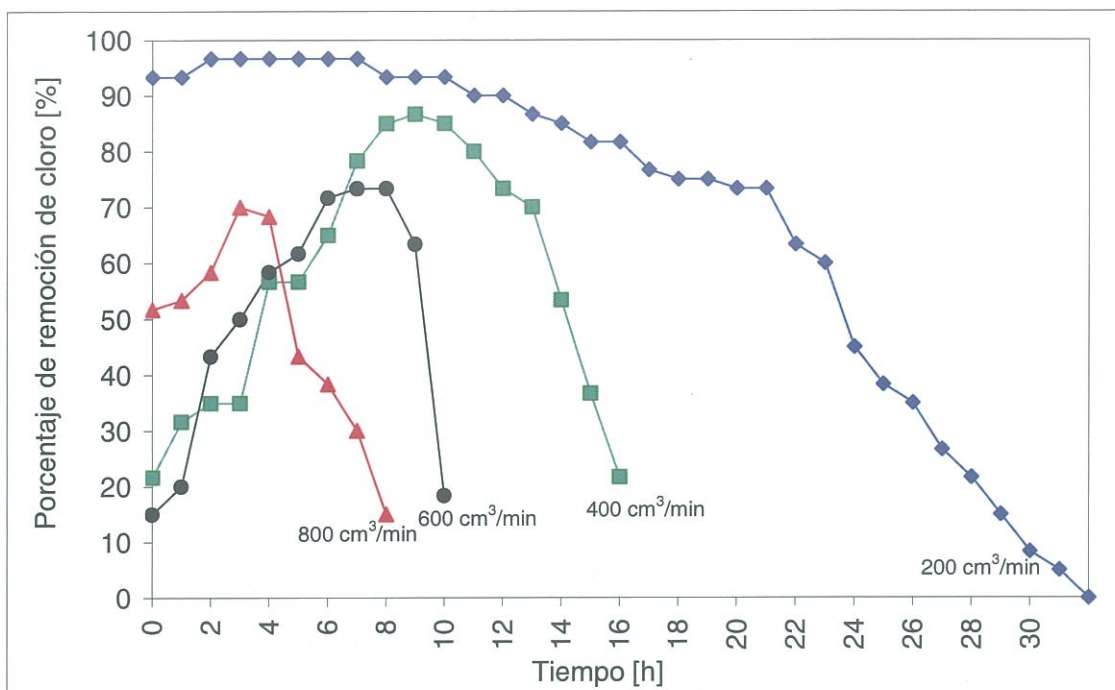


Figura 4.3 a: Curvas de ruptura carbón activado LIFE, comparando porcentaje de remoción de cloro con respecto al tiempo

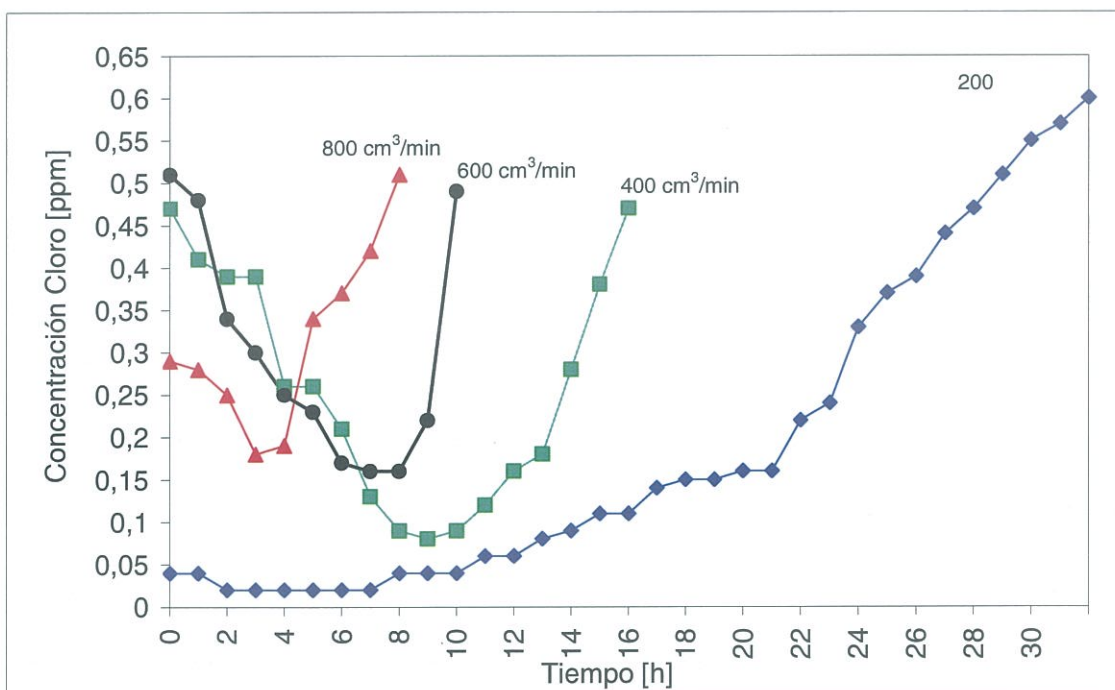


Figura 4.3 b: Curvas de ruptura carbón activado LIFE, comparando concentración de cloro con respecto al tiempo

Tabla 4. 2: Datos curva de ruptura lecho de carbón activado, 200, 400, 600 y 800 cm³/ min.

	Hasta alcanzar equilibrio	Operación en equilibrio	Después del equilibrio	Total
Cantidad de agua tratada (L) 200 cm ³ /min	12	240	132	384
Cantidad de cloro removido (mg) 200 cm ³ /min	7	142	78	227
Tiempo de operación (h)	1	20	11	32
Cantidad de agua tratada (L) 400 cm ³ /min	192	72	120	384
Cantidad de cloro removido (mg) 400 cm ³ /min	113	42	71	227
Tiempo de operación (h)	8	3	5	16
Cantidad de agua tratada (L) 600 cm ³ /min	144	108	108	360
Cantidad de cloro removido (mg) 600 cm ³ /min	85	64	64	212
Tiempo de operación (h)	4	3	3	10
Cantidad de agua tratada (L) 800 cm ³ /min	96	144	144	384
Cantidad de cloro removido (mg) 800 cm ³ /min	57	85	85	227
Tiempo de operación (h)	2	3	3	8

Además de las curvas de ruptura, se analizó la conversión o remoción máxima de la cantidad de cloro con el tiempo de residencia del agua en el filtro para los dos tipos de carbón activado: 12 x 20 de Ecuacarbones y el del proveedor de LIFE como se muestra en la Figura 4.4.

La conversión se calculó relacionando la concentración inicial de cloro en el agua, con el valor de la concentración de cloro mínima obtenida durante la dechloración con cada uno de los carbones activados, a los diferentes caudales de trabajo (200 cm³/min, 400 cm³/min, 600 cm³/min y 800 cm³/min). Estos valores se relacionaron con el tiempo de residencia (τ) que fue calculado dividiendo el volumen total del filtro (216 cm³) para el valor de cada uno de los caudales con los que se trabajó durante los análisis.

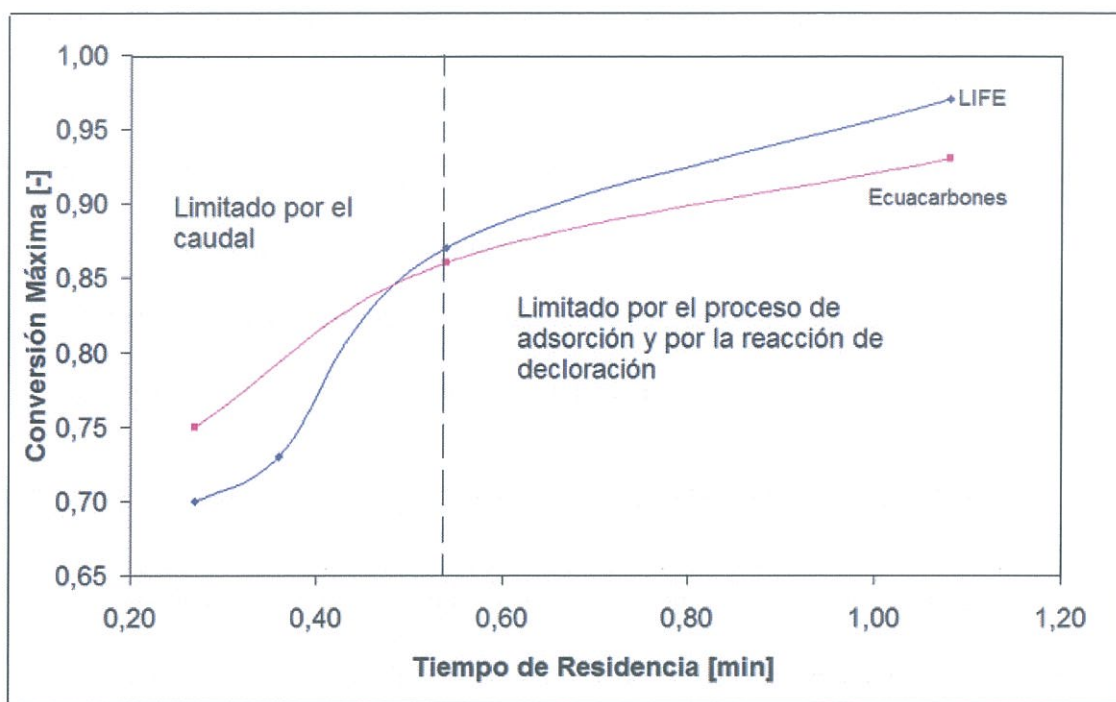


Figura 4. 4: Conversión carbón Ecuacarbones 12x20 y carbón LIFE

Con los datos de conversión se puede determinar que para los dos tipos de carbón utilizados en este análisis, existe un mejor desempeño del filtro cuando se trabaja con los caudales mínimos, esto debido a que en base a la Figura 4.4 se puede ver que la conversión máxima no tiene limitación por el caudal, sino que esta limitada por el proceso de adsorción y por la reacción de decloración en si, por lo que es recomendable trabajar con caudales entre 200 y 400 cm^3/min , para que durante la operación del filtro, el tiempo de contacto entre el agua y el carbón activado sea mayor, y el cloro tenga un mayor contacto con la superficie del carbón activado.

Los dos tipos de carbonos, remueven el cloro de una manera eficiente, sin embargo el carbón activado de LIFE remueve un total de 227 mg de cloro, que es un 25% más de cloro, que el que se remueve con el de Ecuacarbones, que remueve 170 mg de cloro, con lo que queda comprobado lo planteado en la literatura, la decloración mejora mientras el tamaño de partícula es menor (2).

Partiendo de estos análisis, los experimentos posteriores se realizarán únicamente con el carbón activado de LIFE, por su mejor desempeño, y se trabajará con el caudal de $600 \text{ cm}^3/\text{min}$, debido a que el tiempo de operación del filtro es conveniente para trabajar y que los datos experimentales de la curva de ruptura se encuentran en un punto intermedio entre el desempeño óptimo (con el menor caudal posible) y el desempeño deficiente (con el caudal máximo permitido por el rotámetro).

4.2.2. Curvas de ruptura del filtro para una mezcla arena-carbón activado

Para el análisis de la curva de ruptura para una mezcla arena-carbón activado, se construyó un lecho que contenía 50% de arena y 50% de carbón, manteniendo la altura del mismo. Para realizar este análisis se trabajó con un caudal de $600 \text{ cm}^3/\text{min}$.

Sin embargo, no se pudo realizar el experimento, ya que existe una resistencia de la cama de arena al flujo de agua que no permite trabajar con un caudal mayor a $200 \text{ cm}^3/\text{min}$ como se ve en la Figura 4.5.



Figura 4.5: Resistencia de la cama de arena al flujo de agua

Este hecho dio como resultado la fuga de agua por las uniones del filtro, como se muestra en la Figura 4.6



Figura 4.6: Filtración de agua por las uniones

La altura de la cama de arena se redujo notablemente, después de la operación porque la arena se filtró por el carbón y la rejilla y se pierde con el flujo de agua, lo que además hace imposible la medición de la concentración de cloro por la turbidez de la muestra que se ve en la Figura 4.7.



Figura 4. 7: Turbidez de la muestra

Si se desea combinar los filtros, el de arena para remoción de impurezas grandes que puede traer el flujo de agua, y el de carbón activado para la remoción de cloro, se debe diseñar el filtro de arena por separado, considerando el tamaño de malla adecuado para poder trabajar con la arena (tamaño de malla 200) para así evitar la pérdida del material con el efluente, que contamina la muestra y hace imposible continuar con el trabajo deseado.

4.3. Análisis de pérdida de cloro por evaporación

Una muestra de agua (2 L) con una cantidad de cloro determinada se dejó en reposo por 24 horas, se analizó la cantidad de cloro presente cada 2 horas para determinar la velocidad de evaporación de cloro por reposo.

Se obtuvieron los datos que se muestran en la Figura 4.8, en la que se observa que la pérdida de cloro por evaporación sigue una tendencia exponencial.

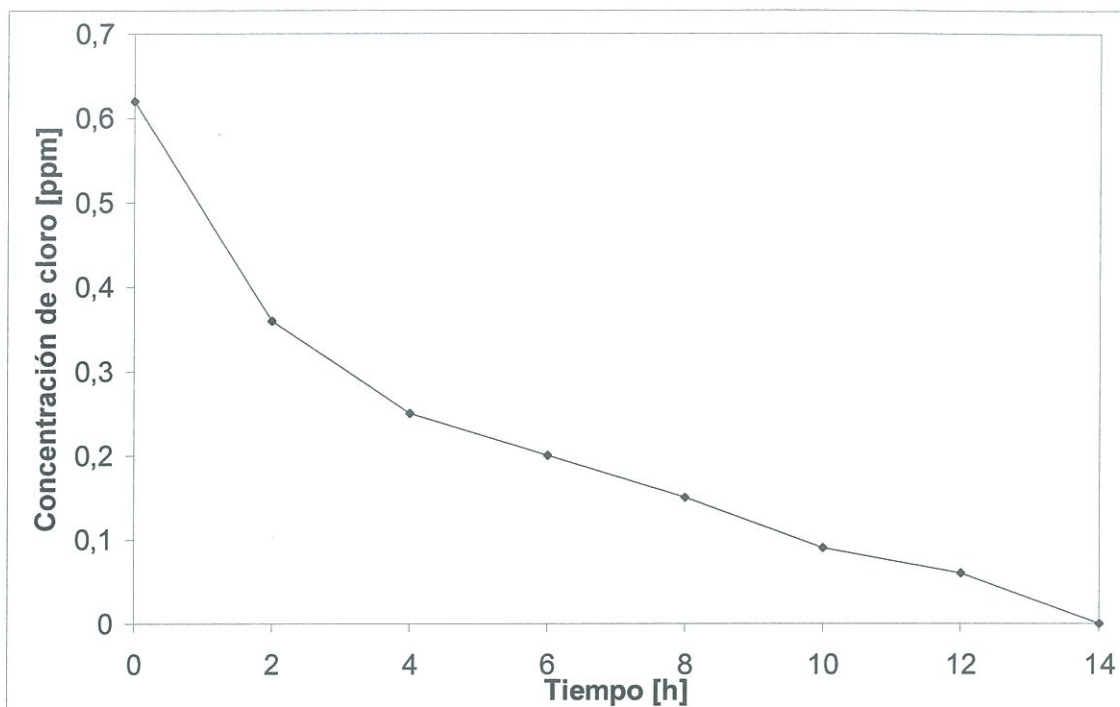


Figura 4. 8: Pérdida de cloro por evaporación

Para comprobar si la tendencia de la pérdida de cloro es exponencial, se linealizó la ecuación $y = 1 - e^{-at}$, con lo que se realizó la Figura 4.9, en la que el $\ln(1-y)$ en función del tiempo permite determinar el valor de la pendiente que da como resultado el factor de multiplicación a que es de $-0,1837$.

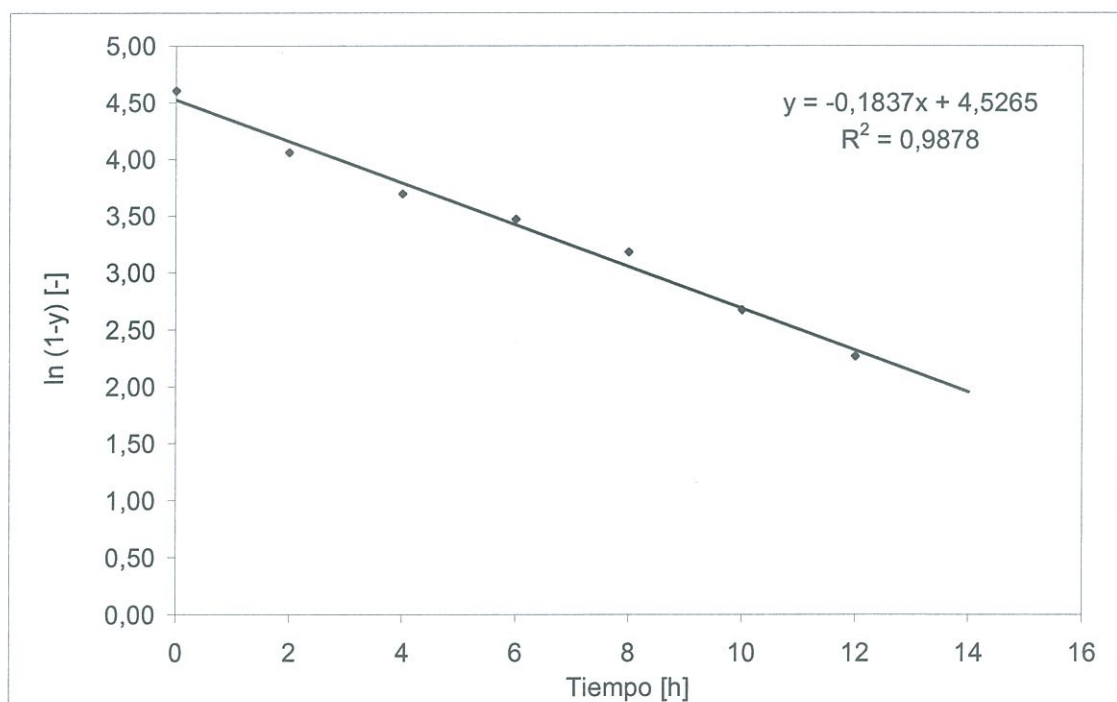


Figura 4. 9: Linealización de la ecuación de tendencia exponencial

Con estos datos se realizó la figura 4.10, en la que se puede ver claramente que la tendencia de la remoción de cloro por evaporación, es exponencial y tiende a 0 a medida que pasa el tiempo.

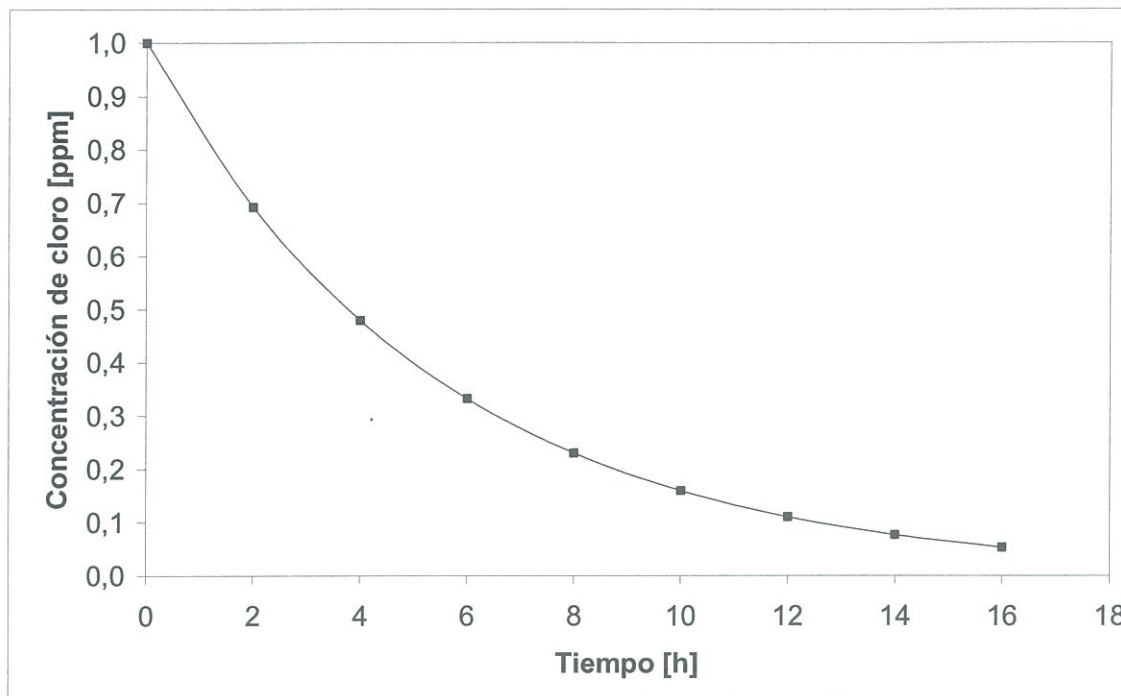


Figura 4. 10: Tendencia exponencial de la pérdida de cloro por evaporación

La cantidad de agua que se puso en reposo es mínima (2L) si la comparamos con la cantidad de agua tratada en el filtro de carbón activado en 14 horas (168L). Por lo que a pesar de que la pérdida de cloro por evaporación es considerable, la cantidad de agua es muy pequeña y requiere un tiempo de reposo prolongado para lograr la deoloración, con reposo se tratan 0.14 L/h aproximadamente, mientras que con el filtro se pueden tratar entre 12 y 48 L/h.

4.4. Reactivación del carbón activado y determinación del tiempo de vida útil.

El carbón activado de LIFE, fue utilizado para el proceso de reactivación. Este carbón se usó para la determinación de la curva de ruptura con un caudal de $600 \text{ cm}^3/\text{min}$, esto debido al tiempo de operación del filtro y a la cantidad de muestras que se debe tomar para caracterizar la curva.

Una vez realizada la primera adsorción de cloro con el carbón, la muestra de carbón se coloca en bandejas de aluminio, en una estufa a 110 °C por 24 horas. Posteriormente, se realiza una nueva curva de ruptura utilizando el mismo caudal de agua. Se mide nuevamente el porcentaje de remoción de cloro y el tiempo de ruptura. Si no existe variación en la curva de ruptura se repetirá el proceso de reactivación, hasta que el carbón activado empeore en su comportamiento de remoción de cloro con lo que se determinará el tiempo de vida útil del lecho de carbón activado en el filtro.

Como se muestra en la Figura 4.11, si bien la remoción de cloro se ve afectada por la regeneración del Carbón Activado. El cambio en la concentración de cloro a la salida del filtro, sigue una tendencia en cuanto a su comportamiento, pero la remoción disminuye de un 76% a un 58% después de la primera regeneración y a un 24% después de la segunda. Los datos obtenidos en este análisis están detallados en el anexo C.

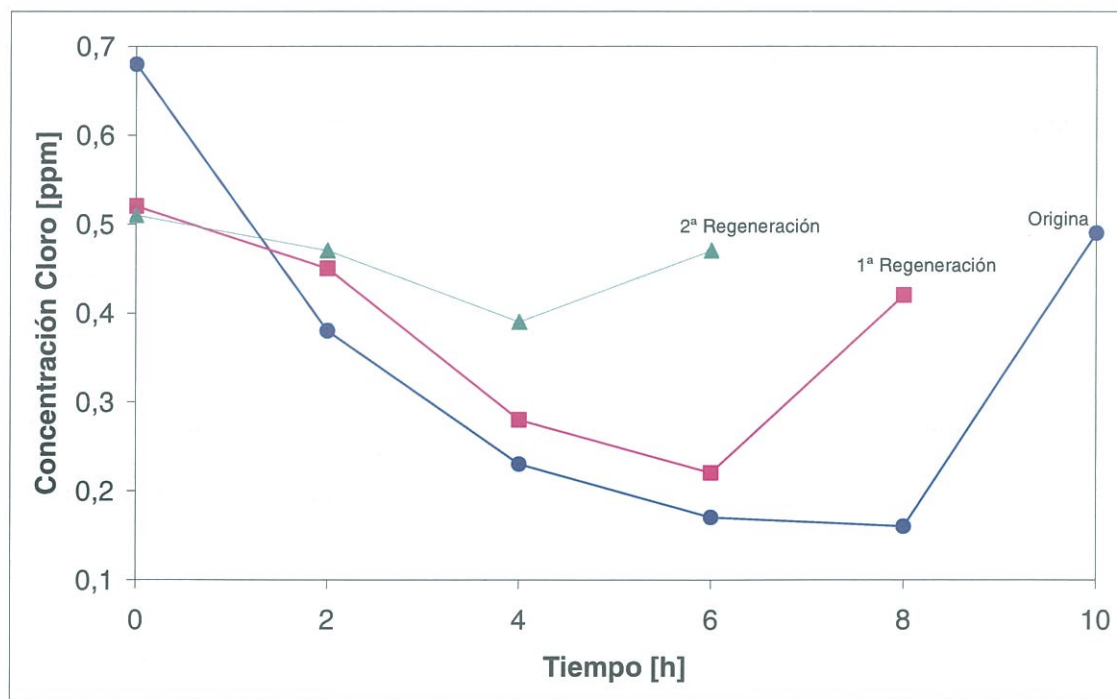


Figura 4. 11: Curvas de ruptura carbón activado regenerado

Al momento de entrar a la regeneración la muestra posee un 32% de humedad, que después de las 24 horas de secado a 110 °C, se traducen en una disminución del peso origi-

nal de la muestra. Esto da como resultado una disminución de 0.5 cm en la altura del lecho de carbón por regeneración, debido a la pérdida de área superficial por exposición a la temperatura conjuntamente con el hecho de que es muy difícil la completa remoción del material del interior del filtro, lo que se traduce en pérdida de altura del lecho de carbón activado.

Con cada regeneración, el tiempo de operación del filtro que disminuye en aproximadamente 2 horas.

4.5. Determinación de la velocidad de reacción para la deoloración de agua con carbón activado

4.5.1. Método diferencial de análisis de velocidad

Si se trabaja con una reacción es irreversible, el orden de reacción y la constante de velocidad se pueden determinar diferenciando numéricamente los datos de concentración contra el tiempo. Esto puede aplicarse cuando la velocidad depende únicamente de la concentración de un solo reactivo (8).

Tomando en cuenta una reacción de volumen constante, se puede combinar la ley de la velocidad expresada en la ecuación [4.1], con el cambio de la concentración de cloro en el tiempo de la ecuación [4.2] para obtener la ecuación a la que se va a aplicar el método de análisis diferencial presente en la ecuación [4.3]

$$-r_A = k_A C_A^\alpha \quad [4.1]$$

$$\frac{dC_A}{dt} = r_A \quad [4.2]$$

$$-\frac{dC_A}{dt} = k_a C_A^\alpha \quad [4.3]$$

Después de sacar el logaritmo natural de ambos miembros de la ecuación 4.3

$$\ln\left(-\frac{dC_A}{dt}\right) = \ln k_A + \alpha \ln C_A \quad [4.4]$$

La pendiente de la gráfica $\ln(-dC_A/dt)$ en función de $\ln C_A$ es el orden de reacción.

Para obtener los valores de $-dC_A/dt$ que usamos en la gráfica, se debe diferenciar los datos de concentración-tiempo numéricamente, utilizando fórmulas de diferenciación numérica (8).

Esto puede ser utilizado si los puntos de datos de la variable independiente están espaciados de manera uniforme, es decir si $t_1 - t_0 = t_2 - t_1 = \Delta t$ (8), si esto es así se aplica las siguientes fórmulas:

$$\text{punto inicial: } \left(\frac{dC_A}{dt}\right)_0 = \frac{-3C_{A0} + 4C_{A1} - C_{A2}}{2\Delta t} \quad [4.5]$$

$$\text{puntos interiores: } \left(\frac{dC_A}{dt}\right)_i = \frac{C_{A(i+1)} - C_{A(i-1)}}{2\Delta t} \quad [4.6]$$

$$\text{último punto: } \left(\frac{dC_A}{dt}\right)_{t_5} = \frac{C_{A3} - 4C_{A4} + 3C_{A5}}{2\Delta t} \quad [4.7]$$

Se usan las ecuaciones 4.5 y 4.7 para el primero y último puntos, respectivamente, mientras que la ecuación 4.6 sirve para los puntos intermedios (8).

Los datos obtenidos están detallados en la tabla 4.3 y para poder realizar los cálculos se utilizó los datos de concentración de cloro en el agua tratada para un caudal de 600 cm^3/min , datos de la curva de ruptura para este caudal trabajado con el carbón activado de LIFE, y se muestran a continuación:

Tabla 4. 3: Datos método diferencial de análisis de velocidad

tiempo (h)	C_A	dC_A/dt	$\ln (- dC_A/dt)$	$\ln C_A$
0	0,68	-0,21	-1,56	-0,39
1	0,5	-0,14	-2,00	-0,69
2	0,38	-0,11	-2,25	-0,97
3	0,29	-0,07	-2,66	-1,24
4	0,23	-0,05	-3,00	-1,47
5	0,19	-0,03	-3,69	-1,66
6	0,17	-0,02	-4,20	-1,77
7	0,16	-0,03	-3,51	-1,83
8	0,16	-0,05	-3,10	-1,83
9	0,22	0,65		
10	0,49	-0,74		

Estos datos dan como resultado la Figura 4.12, a partir de la cual se puede concluir que la pendiente tiene un valor de 1.3, lo que significa que el orden de reacción es 1. La decoloración responde a una cinética de primer orden, lo que significa que la velocidad de reacción depende de la concentración de cloro en una forma directamente proporcional, por ejemplo, si la concentración de cloro se duplica, la velocidad de reacción también se duplica y si la concentración de cloro se reduce a la mitad, la velocidad de reacción también se va a reducir a la mitad y acorde a estos datos, $k = 0.3 \text{ min}^{-1}$

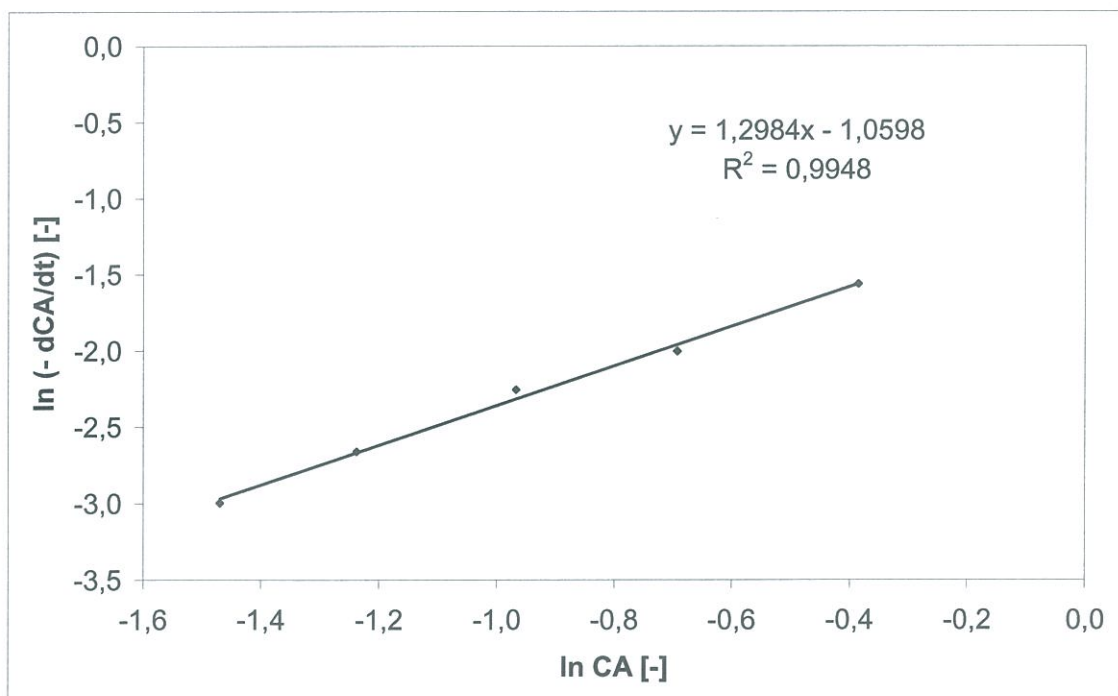


Figura 4. 12: Método diferencial para determinar el orden de reacción

4.5.2. Método integral de análisis de velocidad

Una vez determinado el orden de reacción por el método diferencial de análisis se va a calcular la constante de velocidad de reacción específica k , por el método integral y se va a comprobar los resultados del método diferencial.

El método integral usa un procedimiento de ensayo y error para determinar el orden de reacción (8).

Para determinar la constante de la velocidad se integra la ecuación diferencial para modelar el sistema a volumen constante representado en la ecuación 4.3, en la que se encuentran combinados el cambio en el número de moles de la ecuación 4.2 y la ley de la velocidad de la ecuación 4.1.

La integración del balance de moles y ley de velocidad combinados:

$$\frac{dC_A}{C_A} = -kdt \quad [4.8]$$

con el límite $C_A = C_{A0}$ en $t = 0$ da

$$\int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{dC_A}{C_A} = -k \int_0^t dt \quad [4.9]$$

$$\ln C_A \Big|_{C_{A0}}^{C_A} = -kt \Big|_0^t \quad [4.10]$$

$$\ln C_A - \ln C_{A0} = -kt \quad [4.11]$$

$$\ln \frac{C_{A0}}{C_A} = kt \quad [4.12]$$

Aquí la pendiente de una gráfica $\ln (C_{A0}/C_A)$ en función del tiempo es lineal, con pendiente k .

Los datos obtenidos están detallados en la Tabla 4.4 y para poder realizar los cálculos se utilizó los datos de concentración de cloro en el agua tratada para un caudal de 600 cm^3/min de la curva de ruptura para este caudal trabajado con el carbón activado de LIFE, y se muestran a continuación:

Tabla 4. 4: Datos para el cálculo de k, constante de velocidad de reacción específica

tiempo (h)	C_A	C_{A0}/C_A	$\ln (C_{A0}/C_A)$
0	0,68	1,000	0,000
1	0,5	0,735	0,307
2	0,38	0,559	0,582
3	0,29	0,426	0,852
4	0,23	0,338	1,084
5	0,19	0,279	1,275
6	0,17	0,250	1,386
7	0,16	0,235	1,447
8	0,16	0,235	1,447
9	0,22	0,324	1,128
10	0,49	0,721	0,328

Estos datos dan como resultado la Figura 4.13, de acuerdo a la cual el valor de la constante de velocidad de reacción específica es, $k = 0.27 \text{ min}^{-1}$ y la ley de la velocidad de reacción para la deoloración con carbón activado es: $-r = (0.27 \text{ min}^{-1}) C_A$.

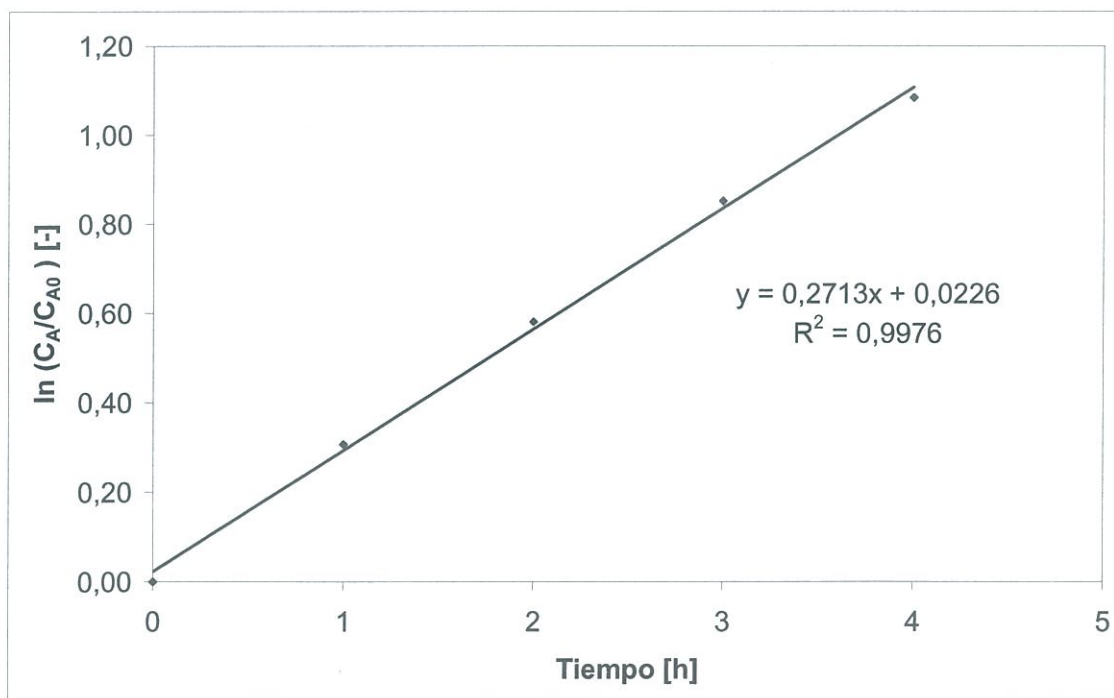


Figura 4. 13: Cálculo de la constante de reacción específica

El valor de la constante k es muy cercano al que se obtuvo para el método diferencial, con un error del 10%, por lo que se puede concluir que la reacción de cloración si responde a una cinética de primer orden.

4.6. Determinación del sistema de control

4.6.1. Ecuación de Control para un Reactor PFR

Un reactor tubular, consiste en un tubo cilíndrico y normalmente se opera en estado estacionario (8). Ya que no existe una variación radial en la concentración, se dice que el reactor es de flujo taponado o de flujo en pistón (PFR, plug-flow reactor) (8).

En el reactor tubular, los reactivos se consumen continuamente a medida que fluyen a lo largo del reactor (8).

Para modelar este reactor, se supone que la concentración varía continuamente en la dirección axial a todo lo largo del reactor, por lo que la velocidad de reacción, que es una función de las concentraciones también varía axialmente (8).

Partiendo de la ecuación general del balance de moles:

$$F_{A0} - F_A + \int r_A dV = \frac{dN_A}{dt} \quad [4.13]$$

donde: F , es la velocidad de flujo molar [mol/s]

r , es la velocidad de reacción [mol/s cm³]

V , es el volumen del reactor [cm³]

N , es el numero de moles [mol]

t , es el tiempo [s]

Para obtener la ecuación de diseño dividiremos al reactor en varios subvolúmenes, como se muestra en la Figura 4.14 de modo que dentro de cada subvolumen (ΔV) la velocidad de reacción se considere uniforme (8).

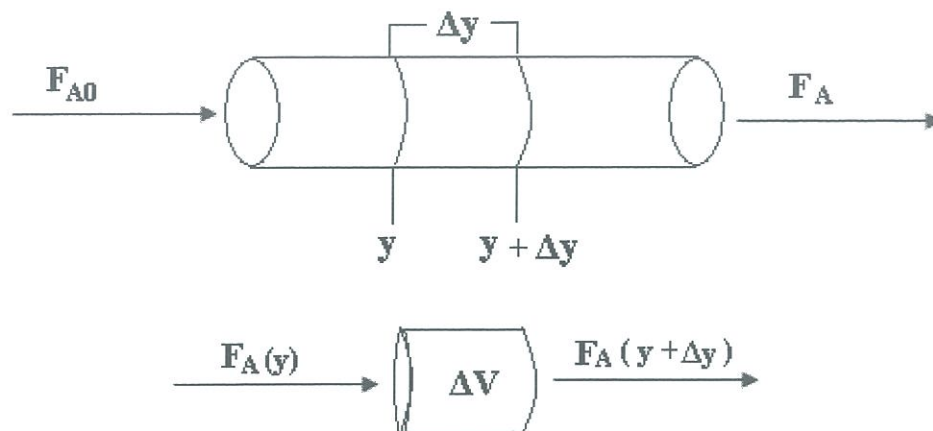


Figura 4. 14: Reactor tubular

Operando en estado estacionario: $\frac{dN_A}{dt} = 0$ entonces la ecuación 4.13 queda:

$$F_{A(y)} - F_{A(y+\Delta y)} + r_A \Delta V = 0 \quad [4.14]$$

La velocidad de flujo molar varía dependiendo del cambio del volumen del reactor, por lo que en un reactor tubular la ecuación de diseño se define como:

$$\frac{dF_A}{dV} = r_A \quad [4.15]$$

En el caso de una reacción de primer orden, la ley de la velocidad es:

$$-r_A = kC_A \quad [4.16]$$

Combinando el balance de moles con la ley de la velocidad

$$\frac{dF_A}{dV} = kC_A \quad [4.17]$$

Puesto que la velocidad de flujo volumétrico \dot{V} es constante,

$$\frac{dF_A}{dV} = \frac{d(C_A \dot{V})}{dV} = \dot{V} \frac{dC_A}{dV} = -kC_A \quad [4.18]$$

Integrando la ecuación con el límite $C_A = C_{A0}$ en $t = 0$ da

$$\int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{dC_A}{C_A} = -\frac{k}{\dot{V}} \int_0^V dV \quad [4.19]$$

$$\ln \frac{C_A}{C_{A0}} = -\frac{k}{\dot{V}} V \quad [4.20]$$

Utilizando las definiciones $\tau = \frac{V}{\dot{V}}$; $d = C_{A0}$; $y = C_A$ se obtiene

$$y = d * e^{-k\tau} \quad [4.21]$$

donde las variables de control son: y , variable de salida; d , es la variable de entrada y τ , es la alteración

Si se sustituye los valores $\tau = 0.36 \text{ min}$; $k = 0.3 \text{ min}^{-1}$ en la ecuación 4.21 se obtiene:

$$y = d * 0.9 \quad [4.22]$$

Reemplazando: d = concentración de cloro inicial en cada tiempo y utilizando como y los datos de concentración de cloro en el agua tratada para un caudal de $600 \text{ cm}^3/\text{min}$, los datos de la curva de ruptura para este caudal trabajado con el carbón activado de LIFE, se presentan en la Tabla 4.5

Tabla 4.5: Variable de Salida, Ecuación de control para un PFR

tiempo (h)	Y experimental	Y calculada
0	0,68	0,61
1	0,5	0,45
2	0,38	0,34
3	0,29	0,26
4	0,23	0,21
5	0,19	0,17
6	0,17	0,15
7	0,16	0,14
8	0,16	0,14
9	0,22	0,20
10	0,49	0,44

Con esta información se realizó una grafica para determinar la correlación de los datos que se encuentra en la Figura 4.15, de la que se puede concluir que el reactor tubular PFR modela el sistema del filtro de carbón activado para la decloración del agua potable con un error de $\pm 5\%$.

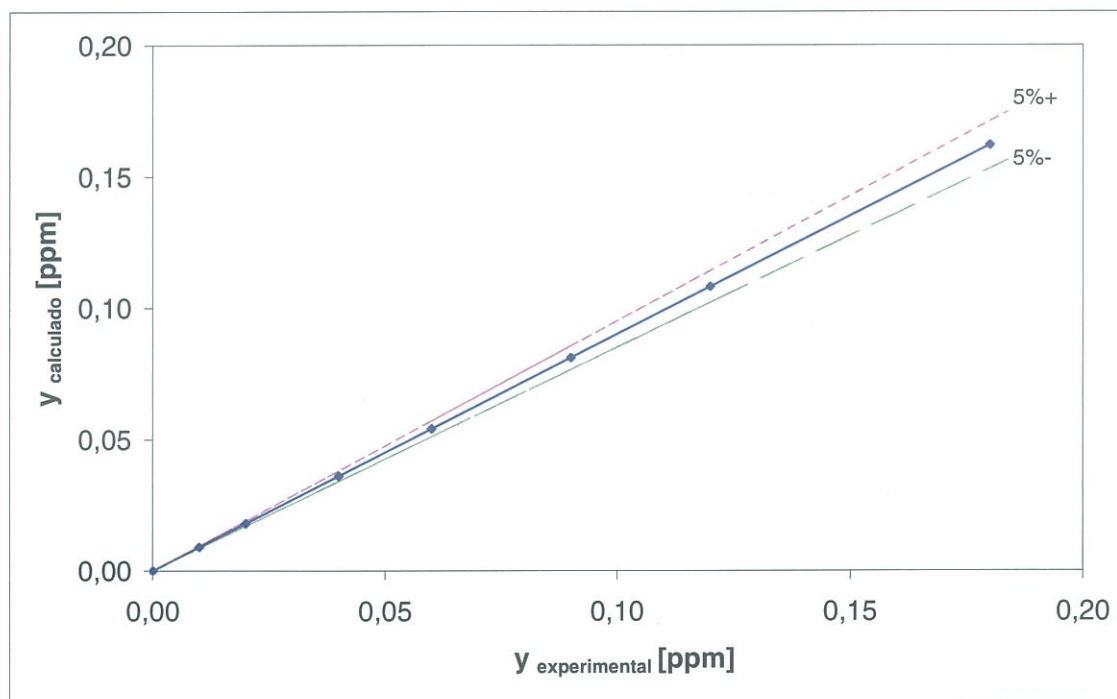


Figura 4. 15: Correlación, sistema de control reactor PFR

Para determinar el régimen de flujo en el filtro de carbón activado se va a utilizar el número de Reynolds, con cada uno de los caudales trabajados: 200 cm³/min, 400 cm³/min, 600 cm³/min y 800 cm³/min, con la siguiente fórmula:

$$\text{Re} = \frac{D \cdot \rho \cdot \dot{V}}{\mu} \quad [4.23]$$

donde: D, es el diámetro interno [cm]

ρ , es la densidad del agua [g/cm³]

\dot{V} , es el caudal [cm³/min]

A, es el área de sección transversal [cm²]

μ , es la densidad [g/cm.min]

Reemplazando los valores: D= 5,08 cm, $\rho=1$ g/cm³, A= 20.3 cm², $\mu = 0,6$ g/cm.min y

\dot{V} con cada uno de los caudales trabajados, se obtienen los datos de la Tabla 4.6.

El número de Reynolds define el tipo de régimen del flujo, tomando en cuenta que para valores menores a 2000 el flujo se considera laminar y para valores mayores a 4000 el flujo se considera turbulento (9).

Tabla 4. 6: Número de reynolds y tipo de régimen de flujo

caudal	# de Reynolds	Regimen
200	83	laminar
400	167	laminar
600	250	laminar
800	334	laminar

Según este análisis el flujo que ingresa al filtro de carbón activado para la decoloración del agua potable tiene un régimen laminar, ya que los valores del número de Reynolds se encuentran por debajo de 2000, que es el límite del régimen laminar.

5. Conclusiones

Partiendo del análisis para la determinación de la relación óptima agua-carbón activado, fue posible el dimensionamiento, la construcción y la puesta en marcha de un filtro de carbón activado, con el que se realizó la caracterización de las curvas de ruptura con diferentes caudales de agua para determinar tiempos de operación óptimos, además de la concentración de ruptura y el tiempo de ruptura, datos fundamentales para poder conocer el momento en el cual el carbón activado debe someterse a un proceso de regeneración que al mismo tiempo permita determinar el tiempo de vida útil del carbón dentro del filtro.

Con los datos experimentales se pudo determinar el sistema de control, partiendo del cálculo de los parámetros de la ley de la velocidad, orden de reacción y constante de velocidad, tomando en cuenta que la cinética de la deoloración de agua con carbón activado responde a una reacción de primer orden.

Después de terminados los análisis experimentales para determinar la relación óptima agua-carbón activado, se puede concluir que las curvas de ruptura se realizarán con el carbón 12x20 de Ecuacarbones y con el carbón de LIFE, ya que ambos tienen un porcentaje de remoción máximo de cloro del 98%, con un máximo en la remoción para una relación 80 a 1 en el caso del carbón de Ecuacarbones y de 50 a 1 en el caso del carbón de LIFE. Es por esto que se toma como relación óptima de trabajo a la relación agua-carbón activado de 50 a 1, ya que es a esta relación a la cual el cloro es eliminado casi en su totalidad, tratando una mayor cantidad de agua con una cantidad de carbón activado pequeña.

Conociendo la relación agua-carbón activado óptima para trabajar, se determinó las curvas de ruptura tanto para el carbón de Ecuacarbones como para el carbón de LIFE, se concluye que el carbón adecuado para la deoloración a escala de laboratorio es el carbón

de LIFE, ya que remueve 25% más cloro (227 mg) que el carbón de Ecuacarbones (170mg), con un 25% más del tiempo de operación del filtro (32 horas de operación con el carbón de LIFE y 24 con el carbón de Ecuacarbones).

Si se compara el tamaño de partícula del carbón activado de LIFE de malla 8x20, con el carbón de Ecuacarbones de malla 12x20, se puede concluir que la decoloración es mejor mientras el tamaño de partícula sea menor, esto debido a que la capacidad de adsorción química del carbón aumenta al disminuir su tamaño, esto debido a que hay un incremento en el área superficial. Además se asocia con el caudal y el tiempo de operación, y se determinó experimentalmente que tienen una relación inversamente proporcional, es decir, al duplicar el caudal, el tiempo de trabajo se reduce a la mitad y viceversa, cosa que no ocurre con la cantidad de cloro removida, ya que se trató el mismo volumen de agua con cada uno de los caudales (200, 400, 600 y 800 cm³/min) que además tenían la misma concentración de cloro inicial. Además, el porcentaje de remoción de cloro y el tiempo de operación fueron mayores con el menor caudal de agua que ingresaba al filtro, y basando la conclusión en la Figura 4.4, se puede notar que hay un equilibrio entre los caudales de 400 y 200 cm³/min, por lo que se ve que no existe restricción por el caudal y que la limitación viene dada por el proceso de adsorción y la reacción de decoloración en si. Si uno tiene menor caudal existe menor velocidad de flujo pero mayor tiempo de contacto entre el agua y el carbón, lo que hace que el tiempo de ruptura sea mayor, lo que significa que se alcanza la concentración de ruptura en un tiempo mayor lo que da como resultado un mayor tiempo de operación y por ende una mejor eficiencia del trabajo del filtro.

Las curvas de ruptura también permiten concluir que la geometría de filtro es importante para obtener un adecuado contacto entre el agua y la cama de carbón activado. Al

trabajar con un cilindro, el comportamiento del agua en el filtro es el de un reactor tubular de flujo en pistón, con la altura como la única variable y área transversal uniforme.

Se determinó también la pérdida de cloro por volatilidad, se dejó un litro de agua reposar al ambiente por 24 horas. Mientras se realizaba el análisis se descubrió que la remoción total de cloro se da a las 14 horas de reposo. A pesar de que la pérdida de cloro por evaporación es considerable, la cantidad de agua es muy pequeña y requiere un tiempo de reposo prolongado para lograr la decloración, con reposo se tratan 0.14 L/h aproximadamente, mientras que con el filtro se pueden tratar entre 12 y 48 L/h.

Para el caudal óptimo de $200 \text{ cm}^3/\text{min}$, la concentración de ruptura para el carbón de LIFE es de 0.18 ppm y el tiempo de ruptura es de 22 horas, removiendo $0.14 \left[\frac{\text{mg Cl}}{\text{g CA} \cdot \text{h}} \right]$

Con estos datos se concluye que para estas condiciones el filtro debe someterse a una regeneración a las 20 horas de trabajo, para evitar que el lecho llegue al agotamiento.

La regeneración mediante el secado de la muestra a $110 \text{ }^\circ\text{C}$ por un lapso de 24 horas permite que la capacidad de decloración del carbón activado se restaure para ser utilizado nuevamente, la remoción de cloro después de la primera regeneración se redujo en un 23 % y después de la segunda regeneración se redujo en un 68% en relación a la remoción que se realizó con la muestra original. Después de la regeneración la altura de la cama de carbón activado se reduce incidiendo directamente en el tiempo de operación del filtro, por lo que es conveniente calcular el tiempo de vida útil de la cama de carbón para poder reemplazarla cuando llegue el momento.

La decloración responde a una cinética de reacción de primer orden, determinada por el método diferencial de análisis de velocidad además de la linealidad que presentan los datos al momento de calcular la constante de reacción específica, por el método integral de análisis de velocidad. El filtro de carbón activado, se debe considerar como un reactor tubular PFR, ya que la ecuación de diseño del PFR se acopla de una manera exacta a

los valores obtenidos mediante la experimentación (ver Figura 4.15) dando un error de $\pm 5\%$.

Con los métodos de análisis de velocidad diferencial e integral, se pudo realizar un modelo matemático para determinar el sistema de control, partiendo del cálculo de los parámetros de la ley de la velocidad, orden de reacción y constante de velocidad, tomando en cuenta que la cinética de la dechloración de agua con carbón activado responde a una reacción de primer orden. Los datos presentados en las Figuras 4.12 y 4.13, indican que los datos se aproximan de forma acertada a una velocidad de reacción de primer orden. La ley de la velocidad de reacción para la dechloración de agua con carbón activado es: $-r_A = 0.3 \cdot C_A$. El cálculo de los valores para el número de Reynolds con los diferentes caudales de trabajo, tomaron valores menores a 2000 que es el límite para el que está definido el régimen laminar, por lo que se puede concluir que el flujo de agua potable que ingresa al filtro de carbón activado para someterse a la dechloración, responde a un régimen laminar.

Se recomienda, construir el filtro de tal forma que se pueda trabajar con el mínimo caudal posible, ya que con esos caudales no existe restricción por el caudal, sino más bien por el proceso de adsorción y por la reacción de dechloración en sí, y si uno tiene menor caudal existe menor velocidad de flujo pero mayor tiempo de contacto entre el agua y el carbón, que se verá reflejado en un aumento de la velocidad de dechloración (ver Figura 4.4).

Se debe trabajar con el carbón activado de menor tamaño de partícula posible, ya que la capacidad de dechloración del carbón activado, aumenta a medida que disminuye su tamaño de partícula. El filtro tiene un mejor desempeño cuando se trabaja con caudales pequeños, por lo que el filtro de carbón activado debe ser dimensionado y construido de tal forma que permita la utilización del menor caudal de entrada posible.

Algunas instalaciones aprovechan el filtro de carbón como si fuera un filtro de arena, colocándolo como primer elemento del pretratamiento de agua. Esto se debe descartar totalmente para los tratamientos de agua farmacéutica, pues significa desproteger el agua de contaminaciones microbianas en el resto del proceso de tratamiento por la eliminación del cloro y, por otra parte, significa el sobredimensionamiento del filtro de carbón para evitar que la adsorción de otras sustancias implique que no sea capaz de eliminar todo el cloro y cloraminas presentes en el agua, lo que a la vez origina riesgos de contaminación en él mismo filtro de carbón.

Deben estar diseñados en cuanto a volumen de acuerdo con el nivel de cloración del agua. Deben contener un carbón adecuado tanto por su origen como por su activación. Debe optarse por filtros de carbón con lavado por contracorriente. El contra lavado significa hacer circular el agua en sentido contrario dentro del filtro de carbón, lo que conlleva que éste se esponje, pues durante la fase de trabajo se va apelmazando, pudiendo llegar a constituirse caminos para el agua en los cuales el contacto entre ambos, agua y carbón, es mínimo y da lugar a la no eliminación del cloro. Este proceso ayuda a preservar en parte la posible contaminación del carbón al introducir el agua por la parte del circuito interno en la que siempre circula sin la presencia de cloro. El contra lavado debe realizarse al menos una vez al día. Debe diseñarse el filtro de tal forma que permita trabajar con los menores caudales posibles.

Una combinación posible puede ser poner un filtro de arena antes del filtro de carbón activado con el fin de retener cualquier contaminante de gran tamaño que pueda venir en el efluente de agua potable. Además sería extremadamente necesaria la utilización de mallas ultrafinas, con el fin de evitar la pérdida de la arena con el efluente que estará en contacto con el carbón activado.

Para mantener el lecho sanitizado se recomienda someterlo a vaporización para lograr la regeneración, cuando la concentración de cloro a la salida del filtro tenga un valor próximo a la concentración de ruptura, para evitar el agotamiento del lecho.

6. Bibliografía

1. COMITÉ DE EXPERTOS DE LA OMS SOBRE ESPECIFICACIONES DE PREPARACIONES FARMACÉUTICAS, *Buenas Prácticas de Manufactura: pautas adicionales para la manufactura de excipientes farmacéuticos*. Informe 35°, Ginebra, Organización Mundial de la Salud, 1999, Anexo 5 (OMS Serie de Informes Técnicos, No. 885).
2. GARCÍA, *Guías de Gestión de Calidad del Líquido de Diálisis (LD)*. Sociedad Española de Nefrología. R. P. Pág. 7; 49-50. Octubre 2003.
3. SCHAEFFER, Kenneth, Carbón Activado: Magia Negra Para Tratamiento de Agua, Agua Latinoamérica, Volumen 3 - Número 5, 2003, Páginas 1-4.
4. TEXTOS CIENTÍFICOS: Química, física, ecología , informática y otras áreas de la ciencia, *Carbón Activo* [En línea]
<http://www.textoscientificos.com/quimica/carbon-activo>
[Consulta: Viernes, 31 de octubre del 2008].
5. CENTRONE, Claudio, *Filtro casero de carbón activado para reducir el contenido de cloro del agua*, Cerveceros Caseros, 2006.
6. SANCHEZ, Gil W, *Granular Activated Carbon Purification of Brewing Water Supplies: Selection, Usage, Monitoring and Replacement*, Volumen 38, Número 2, 2001, pp 99-104.
7. UNITEK, Ingeniería en tratamiento de agua, *Carbón Activado* [En línea]
<http://www.utk.com.br/index.php>
[Consulta: viernes, 5 de septiembre del 2008].
8. FOGLER, Scott H, Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas, Prentice – Hall, Tercera edición, 2001, pp.235-239.
9. METCALF & EDDY, Wastewater Engineering; tercera edición; 1991; pp 317.
10. MERMET, Gerard et all, Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, Ediciones Díaz de Santos, 1992, pp. 1-66.
11. WILLIAM & KOLB, Química para el nuevo milenio, Pearson Education, 2000, pp. 34.
12. RODRIGUEZ, Francisco, Procesos de potabilización del agua e influencia del tratamiento de ozonización, Ediciones Díaz de Santos, 2003, pp. 56, 237.
13. ROCA CUSIDÓ, Alfred, Control de Procesos, Segunda Edición, Alfaomega, 2002, pp 157-163.
14. GOUGH, A.J.E *Factors affecting the choice of granular activated carbon for brewery filters*, Tech. Q. Master Brew. Assoc. Am., 1995, pp. 195-200.

I Anexos

I.1 Nomenclatura

t	tiempo [h] [s]
r_A	velocidad de reacción [gmol A/h.cm^3]
C_{A0}	concentración de cloro en condiciones iniciales [ppm, mg/L]
C_A	concentración de cloro [ppm, mg/L]
F_A	velocidad de flujo molar [gmol/h]
\dot{V}	caudal (velocidad de flujo volumétrico) [cm^3/min]
k	constante de velocidad de reacción específica [min^{-1}]
V	volumen del reactor [cm^3]
τ	tiempo de residencia [min]
N_A	número de moles [mol]
y	variable de salida del sistema de control [ppm]
d	variable de entrada del sistema de control [ppm]
α	orden de reacción [-]
D	diámetro interno del tubo [cm]
ρ	densidad del agua [g/cm^3]
A	área de sección transversal [cm^2]
μ	viscosidad del agua [g/cm.min]

I.2 Tablas de Datos Experimentales obtenidos durante los análisis

I.2.1 Datos de la calibración del rotámetro

Tabla I. 1: Datos de la calibración del rotámetro

CAUDAL NOMINAL (ml/min)	DATO 1	DATO 2	DATO 3	DATO 4	DATO 5	TIEMPO PROMEDIO (min)	VOLUMEN MEDIDO (ml)	CAUDAL REAL (ml/min)
50	0,222	0,208	0,223	0,226	0,234	0,223	10	44,930
100	0,138	0,127	0,127	0,126	0,121	0,128	10	78,268
150	0,078	0,077	0,076	0,083	0,076	0,078	10	128,645
200	0,111	0,115	0,114	0,112	0,111	0,112	20	177,883
250	0,103	0,107	0,111	0,108	0,114	0,109	25	229,920
300	0,082	0,077	0,089	0,086	0,084	0,084	25	299,162
350	0,083	0,086	0,088	0,088	0,088	0,086	30	346,955
400	0,074	0,076	0,073	0,076	0,073	0,074	30	404,313
450	0,066	0,068	0,067	0,068	0,068	0,067	30	445,104
500	0,057	0,061	0,059	0,057	0,057	0,058	30	516,944
550	0,071	0,071	0,071	0,069	0,071	0,071	40	565,504
600	0,050	0,050	0,047	0,050	0,050	0,049	30	609,756
650	0,057	0,057	0,063	0,058	0,061	0,059	40	676,056
700	0,056	0,054	0,055	0,057	0,057	0,056	40	718,563
750	0,052	0,052	0,051	0,053	0,053	0,052	40	765,306
800	0,050	0,050	0,047	0,050	0,050	0,049	40	813,008

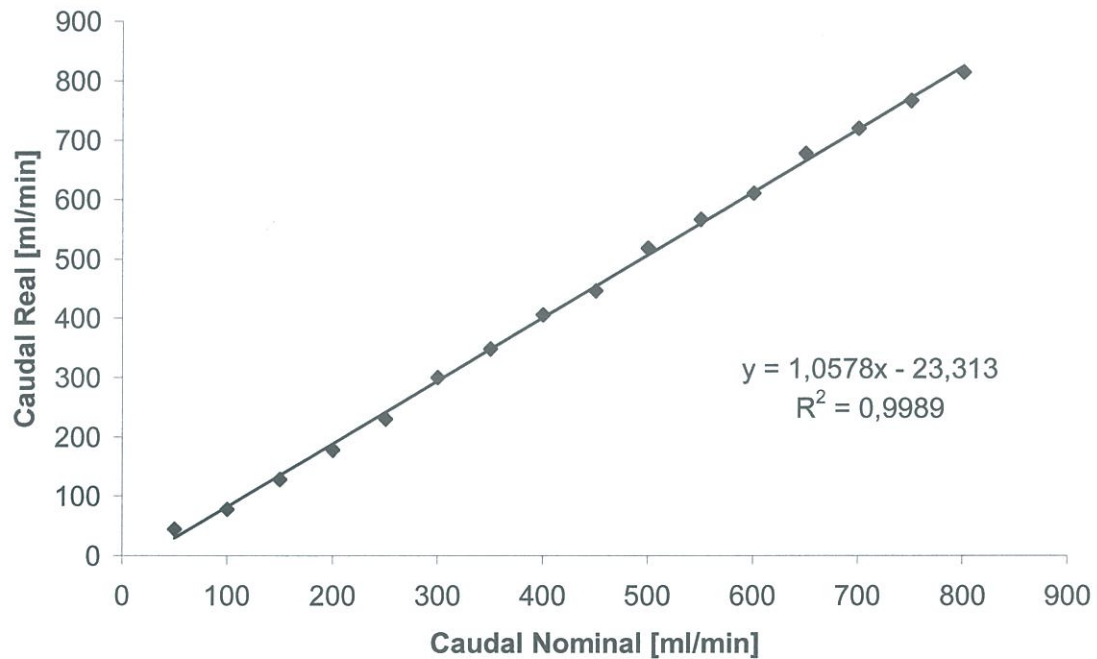


Figura I. 1: Caudal Real Vs. Caudal Nominal

I.2.2 Datos de la determinación de la relación óptima agua-carbón activado

Tabla I. 2: Datos del análisis carbón activado Ecuacarbones 12x20

concentración cloro (ppm) blanco			0,54					
agua (mL)	Carbón Activado (g)	realación agua /carbón	Concentración cloro 1 (ppm)	Porcentaje de remoción 1 (%)	Concentración cloro 2 (ppm)	Porcentaje de remoción 2 (%)	Concentración cloro 3 (ppm)	Porcentaje de remoción 3 (%)
10	0,5	20	0,06	89	0,05	91	0,05	91
20	0,5	40	0,05	91	0,06	89	0,05	91
40	0,5	80	0	100	0,02	96	0,01	98
60	0,5	120	0,08	85	0,07	87	0,08	85
15	1	15	0,01	98	0,01	98	0,01	98
30	1	30	0,02	96	0,01	98	0,02	96
50	1	50	0,02	96	0,03	94	0,02	96
60	1	60	0,05	91	0,05	91	0,07	87
10	2	5	0,08	85	0,08	85	0,09	83
50	2	25	0,03	94	0,01	98	0,03	94
100	2	50	0,03	94	0,04	93	0,03	94
150	2	75	0,03	94	0,03	94	0,03	94

Tabla I. 3: Datos del análisis carbón activado Ecuacarbones 8x20

concentración cloro (ppm) blanco			0,52						
agua (mL)	Carbón Activado (g)	realación agua /carbón	Concentración cloro 1 (ppm)	Porcentaje de remoción 1 (%)	Concentración cloro 2 (ppm)	Porcentaje de remoción 2 (%)	Concentración cloro 3 (ppm)	Porcentaje de remoción 3 (%)	Concentración cloro promedio (ppm)
10	0,5	20	0,15	71	0,15	71	0,14	73	0,15
20	0,5	40	0,03	94	0,03	94	0,03	94	0,03
40	0,5	80	0,07	87	0,07	87	0,06	88	0,07
60	0,5	120	0,02	96	0,02	96	0,03	94	0,02
15	1	15	0,01	98	0,01	98	0,02	96	0,01
30	1	30	0,07	87	0,07	87	0,03	94	0,06
50	1	50	0,06	88	0,05	90	0,06	88	0,06
60	1	60	0,04	92	0,04	92	0,04	92	0,04
10	2	5	0,2	62	0,20	62	0,21	60	0,20
50	2	25	0,15	71	0,15	71	0,03	94	0,11
100	2	50	0,05	90	0,05	90	0,07	87	0,06
150	2	75	0,07	87	0,05	90	0,05	90	0,06

Tabla I. 4: Datos del análisis carbón activado LIFE

concentración cloro (ppm) blanco			0,54					
agua (mL)	Carbón Activado (g)	realación agua /carbón	Concentración cloro 1 (ppm)	Porcentaje de remoción 1 (%)	Concentración cloro 2 (ppm)	Porcentaje de remoción 2 (%)	Concentración cloro 3 (ppm)	Porcentaje de remoción 3 (%)
10	0,5	20	0,05	91	0,04	93	0,05	91
20	0,5	40	0,04	93	0,05	91	0,04	93
40	0,5	80	0,02	96	0,02	96	0,02	96
60	0,5	120	0,08	85	0,07	87	0,08	85
15	1	15	0,03	94	0,04	93	0,03	94
30	1	30	0,02	96	0,03	94	0,02	96
50	1	50	0,02	96	0,02	96	0,02	96
60	1	60	0,05	91	0,05	91	0,06	89
10	2	5	0,08	85	0,07	87	0,08	85
50	2	25	0,06	89	0,06	89	0,07	87
100	2	50	0,01	98	0,02	96	0,01	98
150	2	75	0,08	85	0,07	87	0,08	85

Tabla I. 5: Datos para la determinación de las isotermas de adsorción

LIFE		Ecuacarbones 12x20		Ecuacarbones 8x20	
[mg Cl/L H ₂ O]	[mg Cl/g CA]	[mg Cl/L H ₂ O]	[mg Cl/g CA]	[mg Cl/L H ₂ O]	[mg Cl/g CA]
0,02	0,52	0,09	0,45	0,14	0,38
0,02	0,52	0,01	0,53	0,04	0,48
0,05	0,49	0,05	0,49	0,04	0,49
0,04	0,50	0,02	0,52	0,03	0,49
0,01	0,53	0,01	0,53	0,02	0,50
0,03	0,51	0,04	0,50	0,06	0,46
0,09	0,45	0,01	0,53	0,06	0,47
0,05	0,49	0,05	0,49	0,04	0,48
0,06	0,48	0,08	0,46	0,21	0,31

I.2.3 Datos de la determinación de las curvas de ruptura

I.2.3.1 Datos curvas de ruptura del filtro de carbón activado

Tabla I.6: Datos curva de ruptura 200 cm³/min carbón activado LIFE

concentracion cloro (ppm) blanco				0,6
tiempo (h)	concentración cloro (ppm) 200 cm ³ /min	porcentaje de remoción (%) 200 cm ³ /min	cantidad de cloro (mg) 200 cm ³ /min	Conversión
0	0,04	93	15	0,93
1	0,04	93	15	0,93
2	0,02	97	8	0,97
3	0,02	97	8	0,97
4	0,02	97	8	0,97
5	0,02	97	8	0,97
6	0,02	97	8	0,97
7	0,02	97	8	0,97
8	0,04	93	15	0,93
9	0,04	93	15	0,93
10	0,04	93	15	0,93
11	0,06	90	23	0,90
12	0,06	90	23	0,90
13	0,08	87	31	0,87
14	0,09	85	35	0,85
15	0,11	82	42	0,82
16	0,11	82	42	0,82
17	0,14	77	54	0,77
18	0,15	75	58	0,75
19	0,15	75	58	0,75
20	0,16	73	61	0,73
21	0,16	73	61	0,73
22	0,22	63	84	0,63
23	0,24	60	92	0,60
24	0,33	45	127	0,45
25	0,37	38	142	0,38
26	0,39	35	150	0,35
27	0,44	27	169	0,27
28	0,47	22	180	0,22
29	0,51	15	196	0,15
30	0,55	8	211	0,08
31	0,57	5	219	0,05
32	0,6	0	230	0,00

Tabla I. 7: Datos curva de ruptura 400 cm³/min carbón activado LIFE

concentracion cloro (ppm) blanco				0,6
tiempo (h)	concentracion cloro (ppm) 400 cm ³ /min	porcentaje de remoción (%) 400 cm ³ /min	cantidad de cloro (mg) 400 cm ³ /min	Conversión
0	0,47	22	180	0,22
1	0,41	32	157	0,32
2	0,39	35	150	0,35
3	0,39	35	150	0,35
4	0,26	57	100	0,57
5	0,26	57	100	0,57
6	0,21	65	81	0,65
7	0,13	78	50	0,78
8	0,09	85	35	0,85
9	0,08	87	31	0,87
10	0,09	85	35	0,85
11	0,12	80	46	0,80
12	0,16	73	61	0,73
13	0,18	70	69	0,70
14	0,28	53	108	0,53
15	0,38	37	146	0,37
16	0,47	22	180	0,22

Tabla I. 8: Datos curva de ruptura 600 cm³/min carbón activado LIFE

concentracion cloro (ppm) blanco				0,6
tiempo (h)	concentracion cloro (ppm) 600 cm ³ /min	porcentaje de remoción (%) 600 cm ³ /min	cantidad de cloro (mg) 600 cm ³ /min	Conversión
0	0,51	15	184	0,15
1	0,48	20	173	0,20
2	0,34	43	122	0,43
3	0,3	50	108	0,50
4	0,25	58	90	0,58
5	0,23	62	83	0,62
6	0,17	72	61	0,72
7	0,16	73	58	0,73
8	0,16	73	58	0,73
9	0,22	63	79	0,63
10	0,49	18	176	0,18

Tabla I. 9: Datos curva de ruptura 800 cm³/min carbón activado LIFE

concentracion cloro (ppm) blanco				0,6
tiempo (h)	concentracion cloro (ppm) 800 cm ³ /min	porcentaje de remoción (%) 800 cm ³ /min	cantidad de cloro (mg) 800 cm ³ /min	Conversión
0	0,29	52	111	0,52
1	0,28	53	108	0,53
2	0,25	58	96	0,58
3	0,18	70	69	0,70
4	0,19	68	73	0,68
5	0,34	43	131	0,43
6	0,37	38	142	0,38
7	0,42	30	161	0,30
8	0,51	15	196	0,15

Tabla I. 10: Datos curva de ruptura 200 cm³/min carbón activado Ecuacarbones 12x20

concentracion cloro (ppm) blanco				0,59
tiempo (h)	concentracion cloro (ppm) 200 cm3/min	porcentaje de remoción cloro (%) 200 cm3/min	cantidad de cloro (mg) 200 cm3/min	Conversión
0	0,06	90	17	0,90
1	0,04	93	12	0,93
2	0,05	92	14	0,92
3	0,04	93	12	0,93
4	0,08	86	23	0,86
5	0,08	86	23	0,86
6	0,08	86	23	0,86
7	0,04	93	12	0,93
8	0,1	83	29	0,83
9	0,12	80	35	0,80
10	0,12	80	35	0,80
11	0,15	75	43	0,75
12	0,15	75	43	0,75
13	0,16	73	46	0,73
14	0,18	69	52	0,69
15	0,2	66	58	0,66
16	0,22	63	63	0,63
17	0,27	54	78	0,54
18	0,34	42	98	0,42
19	0,39	34	112	0,34
20	0,4	32	115	0,32
21	0,47	20	135	0,20
22	0,5	15	144	0,15
23	0,58	2	167	0,02
24	0,58	2	167	0,02

Tabla I. 11: Datos Curva de Ruptura 400 cm³/min Carbón Activado Ecuacarbones 12x20

concentracion cloro (ppm) blanco				0,59
tiempo (h)	concentracion cloro (ppm) 400 cm3/min	porcentaje de reomoción cloro (%) 400 cm3/min	cantidad de cloro (mg) 400 cm3/min	Conversión
0	0,58	2	167	0,02
1	0,41	31	118	0,31
2	0,37	37	107	0,37
3	0,22	63	63	0,63
4	0,16	73	46	0,73
5	0,08	86	23	0,86
6	0,08	86	23	0,86
7	0,09	85	26	0,85
8	0,1	83	29	0,83
9	0,12	80	35	0,80
10	0,33	44	95	0,44
11	0,47	20	135	0,20
12	0,58	2	167	0,02

Tabla I. 12: Datos curva de ruptura 800 cm³/min carbón activado Ecuacarbones 12x20

tiempo (h)	concentracion cloro (ppm)		blanco	0,59
	concentracion cloro (ppm) 800 cm3/min	porcentaje de remoción cloro (%) 800 cm3/min	cantidad de cloro (mg) 800 cm3/min	Conversión
0	0,27	54	78	0,54
1	0,18	69	52	0,69
2	0,15	75	43	0,75
3	0,33	44	95	0,44
4	0,42	29	121	0,29
5	0,47	20	135	0,20
6	0,58	2	167	0,02

I.3 Datos de la regeneración del carbón activado

Tabla I. 13: Datos regeneración carbón activado

Carbón Original			Primera Regeneración			Segunda Regeneración		
[Cl] (ppm)	tiempo (min)	Porcentaje de remoción (%)	[Cl] (ppm)	tiempo (min)	Porcentaje de remoción (%)	[Cl] (ppm)	tiempo (min)	Porcentaje de remoción (%)
0,68	0	0	0,52	0	0	0,51	0	0
0,38	120	44	0,45	120	13	0,47	120	8
0,23	240	66	0,28	240	46	0,39	240	24
0,17	360	75	0,22	360	58	0,47	360	8
0,16	480	76	0,42	480	19			
0,49	600	28						