



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTILÁN**

**“TRATAMIENTO DE EFLUENTES CONTAMINADOS
CON CARBOXIMETILCELULOSA USANDO
FILTRACIÓN CONTINUA A VACÍO EN PRESENCIA
DE UN AGENTE COAGULANTE- FLOCULANTE”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA EN ALIMENTOS

PRESENTA:

JOSEFINA LÓPEZ RIVERA

ASESORA: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR

FIGUEROA

CUAUTILÁN IZCALLI, EDO. DE MÉX.

2012



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE

ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ
Jefa del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán.

Con base en el Art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis:

Tratamiento de efluentes contaminados con carboximetilcelulosa
usando filtración continua a vacío en presencia de un agente
coagulante - floculante.

Que presenta la pasante: Josefina López Rivers

Con número de cuenta: 300798692 para obtener el título de:

Ingeniera en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cuautitlan Izcalli, Mex. a

PRESIDENTE IA. Rosa Maribel Rodríguez Montoya

VOCAL IA. Laura Margarita Cortezar Figueroa

SECRETARIO QFB. Leticia Badillo Solís

1er SUPLENTE IA. Ana María Soto Bautista

2º SUPLENTE IA. Javier Cruz Maranto

DEDICATORIAS

☪ ☪ A mi madre Josefina Rivera Sánchez, quien con sus enseñanzas, ejemplo, trabajo, apoyo, paciencia y amor ha hecho de mi la mujer que soy hoy en día y la que seré toda mi vida. Para ti mamita con todo mi amor un pequeño triunfo nuestro.☪ ☪

☪ ☪ A mi hermano Jesús Alberto López Rivera, mi compañero, cómplice y amigo de toda la vida. Hemos aprendido juntos y lo seguiremos haciendo juntos en nueva aventuras. Para ti manito un poquito de ciencia loca.☪ ☪

☪ ☪ A mi padre Jesús López Manríquez, quien plantó en mí la inquietud por el conocimiento. Para ti desde mi corazón hasta tu estrella brillante. Ilumina nuestro camino.☪ ☪

☪ ☪ Al amor de mi vida Jorge David Altamirano Lugo, por todos los momentos en los que has estado para levantarme con tu amor y motivarme a seguir adelante. Un pequeño paso del resto de nuestras vidas. 521.☪ ☪

AGRADECIMIENTOS

A la I.A. Laura Margarita Cortázar Figueroa por todo el apoyo, los conocimientos y orientación para la realización de este trabajo. Gracias por ser mi guía y amiga.

A todos los que han llegado a mi vida para dejar un tatuaje en mi corazón. Adriana Arzola y Leyfa Vackimes mis hermanas; Ma. Del Sol Lara Flores mi amiga y conciencia; Patricia Díaz mi brújula; Alma, Carmen, Angélica, Maribel, Benjamín, Aranzazú, Dulce, Nelda, Ana Luisa, Familia López, Familia Rivera, Familia Altamirano y todos ustedes amigos que cerca o lejos han participado directa o indirectamente en mi forma de ser.

Al Ing. Guillermo Díes Angúlo por su apoyo y enseñanzas que me brindó durante el tiempo que tuve el placer de trabajar a su lado.

A Dios por permitir llegar hasta aquí.

A mis angelitos de la guarda.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE GRÁFICAS	10
ÍNDICE DE TABLAS	12
NOMENCLATURA	13
RESUMEN	16
INTRODUCCIÓN	19
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES	23
1.1. El Agua	23
1.1.1 La química del agua	24
1.1.2. El ciclo del agua	25
1.1.3. Situación del agua en el mundo	29
1.1.4. Situación del agua en México	32
1.2. La contaminación del agua	36
1.2.1. Tratamiento de agua	38
1.2.2. Tratamiento de aguas residuales	41
1.2.3. Agentes coagulantes y floculantes	44
1.2.3.1. Sulfato de Aluminio	46
1.3. Filtración	47

1.3.1.	Fuerzas y resistencias presentes	50
1.3.2.	Ayudafiltros	53
1.3.3.	Tipos de filtros	56
1.3.4.	Ecuaciones utilizadas en filtración continua	59
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA		66
2.1	Cuadro metodológico	66
2.2.	Desarrollo metodológico	69
Problema		69
Objetivo particular 1		69
Determinación de condiciones de pH		72
Determinación del comportamiento reológico (Modelo Newtoniano)		73
Determinación del comportamiento reológico (Modelo de la potencia)		75
Objetivo particular 2		77
CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN		84
3.1	Objetivo particular 1	84
3.1.1	Curvas de comportamiento reológico	84
3.1.2	Determinación de adición de coagulante $Al_2(SO_4)_3$	90
3.2	Objetivo particular 2	92

3.2.1	Filtración a nivel laboratorio	92
3.2.2	Filtración a nivel piloto	96
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES		103
BIBLIOGRAFÍA		105
APÉNDICE A		113

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1	Puentes de hidrógeno (La Fuente Larrauri, 2006)	13
Fig. 2	Ciclo del agua (IES, 2009)	14
Fig. 3	Distribución global del agua (UIA, 2008)	15
Fig. 4	Precipitación pluvial mundial (USGS, 2009)	16
Fig. 5	Consumo anual de agua (UIA, 2008)	16
Fig. 6	Precipitación mensual promedio a lo largo del territorio mexicano (CONAGUA, 2008)	17
Fig. 7	Disponibilidad del agua en México (CONAGUA, 2008)	18
Fig. 8	Distribución del uso del agua en México (CONAGUA, 2008)	18
Fig. 9	Esquema general del tratamiento de aguas residuales (Britannica, 2010)	23
Fig. 10	Filtración de torta (Aguado, 2003; Geankoplis, 2000; Ordoñez, 1996)	25
Fig. 11	Corte de una torta de filtración (Geankoplis, 2000; Toledo, 2007; Ordoñez, 1996)	26
Fig. 12	Tipos de tortas (Aguado, 2003)	27
Fig. 13	Adición en Precapa (Geankoplis, 2000; Toledo, 2007; Ordoñez, 1996)	28

Fig. 14	Adición en Dosificación (Geankoplis, 2000; Toledo, 2007; Ordoñez, 1996)	28
Fig. 15	Esquema general del funcionamiento del filtro de tambor rotatorio común (Geankoplis, 2000)	30
Fig. 16	Esquema del filtro de tambor rotatorio (Geankoplis, 2000; Ordoñez, 1996)	32
Fig. 17	Gráfica de θ_f vs V_f (Ordoñez, 1996; Toledo, 2007)	33
Fig. 18	Gráfica de $(\Theta - V/q)$ vs V^2 (Ordoñez, 1996; Toledo, 2007)	34
Fig. 19	Filtro de tambor rotatorio utilizado en el proyecto	42
Fig. 20	Apariencia de la muestra tras la coagulación	46

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1	Curva de esfuerzo vs velocidad de cizalla para muestras con comportamiento newtoniano	43
Gráfica 2	Curva de esfuerzo vs velocidad de cizalla para muestras con comportamiento no newtoniano del tipo fluidificante	44
Gráfica 3	Curva de viscosidad contra concentración de CMC	44
Gráfica 4	Curva de índice de comportamiento al flujo (n) contra concentración de CMC	45
Gráfica 5	Curva de índice de comportamiento al flujo (n) contra concentración de CMC	45
Gráfica 6	Velocidades de filtración para filtrados de CMC al 0.4% coagulada en condiciones de precapa y dosificación	48
Gráfica 7	Velocidades de filtración para filtrados de CMC al 0.4% coagulada en condiciones de precapa, dosificación y mixto	49
Gráfica 8	Velocidad de filtración para eventos realizados a nivel planta piloto	51
Gráfica 9	Resultados estadísticos para Rm	51

Gráfica 10	Resultados estadísticos para α	53
Gráfica 11	Resultados estadísticos para Capacidad del ciclo de filtración	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Resultados obtenidos para 0.4% de CMC con la adición de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	47
Tabla 2	Resultados obtenidos para 0.6% de CMC con la adición de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	47
Tabla 3	Viscosidad de los filtrados a nivel laboratorio	50
Tabla 4	Viscosidad de los filtrados a nivel laboratorio	51
Tabla 5	Viscosidad de los filtrados a nivel piloto	54

NOMENCLATURA

A: Área de filtración (m^2).

At: Área total disponible para la filtración (m^2).

C: Masa de sólidos depositados por unidad de volumen de filtrado (Kg/m^3).

d : Distancia desde el centro del tambor a la superficie del líquido (m).

K: Índice de consistencia ($Pa*s^n$).

K': Constante que involucra a α : $\frac{\alpha C}{A}$ (Adimensional).

n : Índice de comportamiento al flujo (Adimensional).

n' : Pendiente de la curva de V vs Θ a $C=0$ (s/m^3).

n' : Pendiente de la curva ($\Theta-V/q$) vs V^2 (s/m^6).

N: Velocidad de rotación (RPM).

P: Presión (Pa).

P': Presión en la superficie del medio filtrante (Pa).

P_a : Presión en la superficie de la torta (Pa).

P_b : Presión a la salida del medio filtrante (Pa).

q : Gasto volumétrico (m^3/s).

R : Radio del tambor (m).

R_m : Resistencia del medio filtrante (m^{-1}).

V : Volumen (m^3).

V_f : Volumen final del filtrado (m^3).

α : Resistencia específica de la torta (m/Kg).

$\dot{\gamma}$: Velocidad de cizalla (1/s).

$(-\Delta P)_c$: Caída de presión en la torta (Pa).

$(-\Delta P)_m$: Caída de presión en el medio filtrante (Pa).

$(-\Delta P)_T$: Caída de presión total en el sistema (Pa).

η : Viscosidad (Pa*s).

θ : Tiempo (s).

θ_c : Tiempo del ciclo de filtración (s).

θ_f : Tiempo de filtración en el ciclo (s).

σ : Esfuerzo de cizalla (Pa).

φ : Ángulo de sumergencia (°).

RESUMEN

A lo largo del tiempo, muchas personas de diversas áreas de trabajo, científicos, ingenieros, ecologistas y más, se han tenido que enfrentar al problema del manejo de residuos contaminantes en todas sus modalidades. Para la gestión ambiental, existen textos especializados, investigaciones y gestiones regulatorias que definen un marco de acción para los diversos problemas ambientales que impactan al planeta. Sin embargo, son pocos los recursos que se enfocan en tecnologías alternativas que permitan atacar problemas específicos de contaminación.

Uno de los problemas ambientales severos es la contaminación del agua. Las aguas residuales contienen una amplia variedad de contaminantes y estas al ser tratadas inadecuadamente pueden llegar a causar severos problemas en los ecosistemas.

En la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, como parte de la Carrera de Ingeniería en Alimentos se imparte el Laboratorio Experimental Multidisciplinario en la Nave 2000-Alimentos. En dicha asignatura los alumnos desarrollan proyectos donde es necesario el uso de fluidos modelos, en especial durante los laboratorios LEM III y LEM IV. De estos fluidos, los más comunes

han sido las disoluciones de carboximetilcelulosa (CMC) en diferentes concentraciones, que han llegado a generar problemas en los drenajes de descargas al derivar con obstrucciones de las líneas.

A lo largo de este proyecto, se evaluaron diversas alternativas para la separación de CMC del agua, que pudieran resultar prácticas y aplicables dentro de las instalaciones de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán C-1, con exactitud dentro de la Nave 2000 ubicada aquí mismo. El objetivo, era el utilizar la infraestructura existente aplicada a filtración continua a vacío como una alternativa viable para lograr la separación de las gomas tras una separación química por medio del uso de sulfato de aluminio.

Se encontró que es viable el uso del filtro de tambor rotatorio aplicado a la separación física del contaminante obteniendo al final un fluido que va de un comportamiento no newtoniano a uno cuyo comportamiento es newtoniano al someterlo a una separación química del compuesto disperso, por medio del uso de sulfato de aluminio a una concentración de 0.3% con un pH de 11, sometido posteriormente a una filtración continua a una presión de 9997.3 Pa a una velocidad de rotación de 6 RPM con una precapa de 1/8".

Concluimos que es posible aplicar esta metodología al tratamiento de descargas residuales compuestas de CMC y obtener un fluido con comportamiento reológico muy parecido al comportamiento del agua en estado puro, cubriendo con esto solo una fracción del proceso de tratamiento de aguas residuales.

INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos naturales fundamentales, que junto con el aire, el suelo y la energía constituyen los cuatro recursos básicos en que se apoya el desarrollo sustentable. Es uno de los compuestos más abundantes de la naturaleza, cubre aproximadamente las tres cuartas partes de la superficie de la tierra. Sin embargo, la cantidad de agua disponible es ciertamente escasa, aunque el mayor problema es aún su distribución irregular en el planeta (Oriente, 2000). Las fuentes naturales como los manantiales, las cuencas, cañadas, y de más fuentes, están en acelerada vía de extinción. Hay cambios de clima y de suelo que provocan, inundaciones, sequías y desertización, sin embargo, es la acción humana la más drástica en el tema del agotamiento del importante líquido (PNUMA, 2000).

En México, durante las últimas décadas, los problemas relacionados con el déficit del agua de primer uso y la contaminación de las fuentes de agua se han agudizado, sobre todo en las zonas áridas y semiáridas, así como en las regiones de mayor concentración de la población y en las de desarrollo industrial intensivo. Problemas como agotamiento de acuíferos profundos y contaminación de cuerpos de aguas superficiales,

intrusión salina, entre otros, son fenómenos cada vez más frecuentes. Debido a esto, existen grandes cantidades de aguas residuales, las cuales, después de un tratamiento adecuado, pueden ser utilizadas para reducir las demandas del sector municipal, industrial, agrícola y recreativo, particularmente en sitios con poca disponibilidad. Considerando esta situación, es necesario recurrir a diferentes tecnologías para hacer posible que estas aguas vuelvan a ser destinadas para uso ya sea humano o de otro tipo (Mijaylova, 2002; Carrillo, 2008).

La Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán Campo I, se encuentra en el municipio de Cuautitlán Izcalli que se localiza en la parte noroeste de la cuenca de México. Su cabecera se ubica en las coordenadas 19° 40' 50" de latitud norte y a los 99° 12' 25" de longitud oeste. Colinda al norte con los municipios de Tepetzotlán y Cuautitlán, al este con Cuautitlán y Tultitlán, al sur con Tlalnepantla de Baz y Atizapán de Zaragoza y al oeste con Villa Nicolás Romero y Tepetzotlán. Tiene una altura promedio de 2,252 metros sobre el nivel del mar. La principal corriente de agua en el municipio es el río Cuautitlán, que atraviesa una extensión aproximada de 40 kilómetros del territorio municipal. Otras corrientes son el río Hondo de Tepetzotlán, San Pablo y San Pedro. Los principales cuerpos de agua son cinco: la presa de Guadalupe, la laguna de la Piedad, el Espejo de los Lirios, la presa de Angulo y la laguna de Axotlán (INAFED, 2005; Camargo, 2000).

En la actualidad, el municipio atraviesa por crisis severas de escasez de agua potable, así como la necesidad de abastecer actividades principalmente de carácter habitacional e industrial (dando servicio a seis parques industriales), que día con día aumenta. Las principales industrias de la zona se refiere en un 30.6% a la producción alimenticia, bebidas y tabacos; la de textiles y prendas de vestir el 10%; productos de madera el 5.22%; productos de papel 3.83%; sustancias químicas y productos derivados del petróleo, carbón, hule y plástico el 13.25%; productos no metálicos el 1.74%; industria metálica básica 3.83% y, en productos metálicos, maquinaria y equipo 31.56% (INAFED, 2005).

En Cuautitlán Izcalli, el suministro de agua se realiza a través de redes de pozos profundos, un ramal del sistema Cutzamala y de algunas de las presas del municipio. La cuenca del valle de México consume $82\text{m}^3/\text{s}$ de agua potable (Metropolitana, 2010). Del 100% de agua que se surte al municipio, la universidad consume gran cantidad para satisfacer las actividades académicas y de servicio de la facultad, dando como resultado, descargas residuales particulares (Camargo, 2000).

La finalidad de este proyecto fue el desarrollo de una metodología para implementar el uso del filtro de tambor rotatorio, con el que cuenta la Nave 2000, para cubrir una parte

de la separación física de contaminantes sin intentar ser considerada como un tratamiento de aguas residuales completo e integral, al enfocarse a una fracción del sistema de tratamiento y donde, dependiendo del destino o función que se le dará al agua, puede variar. Esta investigación es una propuesta para la disposición de desechos contaminados dentro de las instalaciones de la FES Cuautitlán y con una amplia posibilidad de ser aplicada aquí y en industrias donde se manejen desechos similares.

La metodología propuesta se reconoce como una alternativa al proceso de filtración dentro del tratamiento de efluentes contaminados. Se obtuvieron buenos resultados al manejar las disoluciones de goma CMC tratadas con sulfato de aluminio al aplicarles bajas presiones de filtración y la adición de ayuda filtro en precapa a una velocidad de rotación alta, situación que permite manejar el efecto de la compresibilidad de la torta formada.

Al margen de esta aplicación tecnológica, se espera que la metodología propuesta pueda llegar a orientar al alumnado en el desarrollo de metodologías viables de aplicación como parte de proyectos estudiantiles y promover a la comprensión de la teoría de filtración.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES

1.1. El Agua

Sin duda alguna, los primeros organismos vivos en la tierra aparecieron en un entorno acuoso y evolucionaron en función a las propiedades de ese medio. En nuestro planeta, el agua es la única sustancia que coexiste abundantemente en los tres estados físicos posibles. Es el líquido común y el sólido puro más ampliamente distribuido en el planeta; se encuentra suspendida en la atmósfera o bien en la superficie terrestre. Es esencial para la vida al regular la temperatura corporal, es un disolvente universal, puede ser utilizada como vehículo portador de nutrientes y productos catabólicos en el organismo, funciona como medio de reacción, como lubricante, como plastificador, como estabilizadora de la conformación de biopolímeros, como inductora del comportamiento dinámico de macromoléculas, incluyendo sus propiedades enzimáticas, entre otras funciones. Por otra parte, el agua también es el principal componente de muchos alimentos teniendo cada uno un contenido específico de este, cuya cantidad y localización influyen profundamente en la estructura, aspecto y sabor de los mismos (Fennema, 2000).

1.1.1 La química del agua

El agua es la sustancia más abundante en los sistemas vivos. Constituye un 70% o más del peso de la mayoría de los organismos. Las fuerzas de atracción entre moléculas de agua y la débil tendencia del agua a ionizarse tienen una importancia crucial para la estructura y función de biomoléculas. La molécula del agua y sus productos de ionización, H^+ y OH^- , influyen de manera profunda sobre la estructura, autoensamblaje y propiedades de los componentes celulares como las proteínas, ácidos nucleicos y lípidos (Lehninger, 1995).

La capacidad del agua para intervenir en la formación tridimensional de enlaces de hidrógeno, permite explicar muchas de sus propiedades como su capacidad calórica, punto de fusión, punto de ebullición, tensión superficial y entalpías de la diversidad de transiciones de fase; todas estas características están relacionadas con la energía extra necesitada para romper los enlaces de hidrógeno intermoleculares. Los puentes de hidrógeno (*Fig.1*) entre moléculas de agua, proporcionan las fuerzas de cohesión que hacen que el agua sea líquida a temperatura ambiente y que favorecen el extremo ordenamiento de las moléculas típico del agua en estado sólido. Las moléculas polares se disuelven fácilmente en el agua porque pueden reemplazar las

interacciones agua–agua por interacciones agua–soluto energéticamente más favorables (Fennema, 2000; Lehninger, 1995).

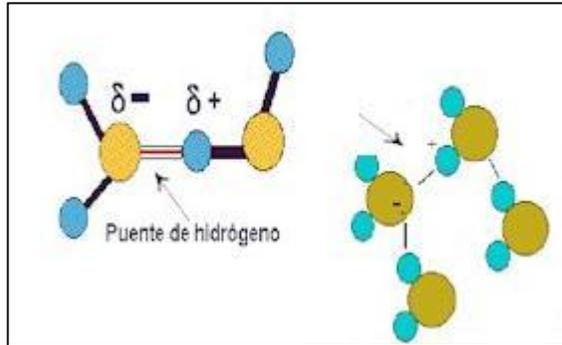


Fig. 1: Puentes de hidrógeno (La Fuente Larrauri, 2006).

1.1.2. El ciclo del agua

De alguna manera podríamos decir que el total de agua que existe en la tierra en todas sus fases se ha mantenido constante desde el inicio, por lo que se ha usado durante millones de años y se ha conservado reciclándose constantemente. Este interminable ciclo del agua en la tierra es conocido como ciclo hidrológico (Marcano, 2007).

El ciclo del agua (Fig. 2) es, en esencia, la consecuencia de fenómenos físicos por medio de los cuales el agua pasa de la superficie terrestre a la atmósfera en forma de vapor de agua ya sea por evaporación o sublimación, para luego regresar por

condensación a su estado líquido, llevándose a cabo una serie de intercambios de humedad entre la atmósfera, la tierra y el mar, ya sea en forma líquida, sólida o gaseosa (Marcano, 2007; PNUMA, 2000).

El calor es la energía necesaria para que ocurra la evaporación. La energía es utilizada para romper los enlaces que mantienen unidas a las moléculas de agua, es por esto que el agua se evapora más fácilmente en el punto de ebullición que es a 100°C a nivel del mar (presión de 760 mmHg) y se evapora más lentamente en el punto de congelamiento que es a 0°C. Cuando la humedad relativa del aire es del 100%, que es el punto de saturación máximo, la evaporación no puede continuar ocurriendo. La evaporación es el principal proceso mediante el cual el agua cambia de estado e ingresa a la atmósfera en forma de vapor. Diversos estudios demuestran que los océanos, mares, lagos y ríos proveen alrededor del 90% del agua del planeta y el restante 10% proviene de la transpiración de las plantas alrededor del mundo (USGS, 2009).

Las etapas del ciclo del agua (Fig.2) son:

1º • Evaporación y Sublimación: el agua se evapora de la superficie oceánica, terrestre y los seres vivos. Los seres vivos, especialmente las plantas, contribuyen con un 10% del agua que se incorpora a la atmósfera. La sublimación, que ocurre en la

superficie helada de los glaciares, se lleva a cabo en menor medida.

2º • Condensación: el agua en forma de vapor, se eleva y se condensa formando las nubes.

3º • Precipitación: el agua en la atmósfera cae. En esta etapa, la atmósfera pierde agua por condensación (lluvia y rocío) o sublimación inversa (nieve , escarcha o hielo) que pasan según el caso, a la superficie terrestre o a la superficie del mar. En el caso de la lluvia, la nieve y el granizo, la gravedad determina la caída; mientras que en el rocío y la escarcha el cambio de estado se produce directamente sobre las superficies que cubren.

4º • Infiltración: ocurre cuando el agua alcanza el suelo. Esta, penetra a través de sus poros y pasa al subsuelo. La proporción de agua que se infiltra y la que circula en superficie depende de la permeabilidad del sustrato, de la pendiente y de la flora. Parte del agua infiltrada vuelve a la atmósfera por evaporación, por la transpiración de las plantas o bien al unirse en algún lugar con los acuíferos superficiales. Otra parte se incorpora a los acuíferos superficiales como lagos o ríos.

5º • Escurrimiento: este ocurre cuando el agua líquida se desliza cuesta abajo por la superficie del terreno ya sea de forma superficial o bien subterránea debido a lluvia o por deshielo. En

los climas desérticos, el escurrimiento es el principal agente geológico de erosión y transporte de sólidos.

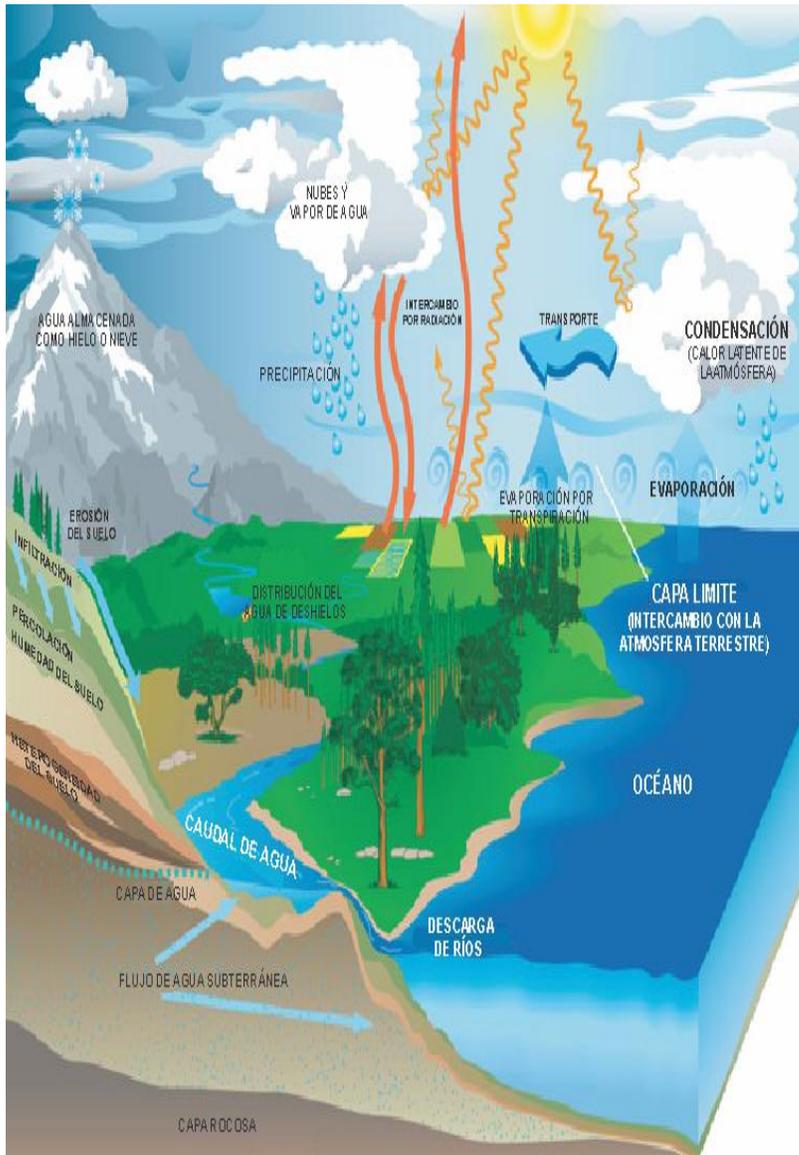


Fig. 2: Ciclo del agua (IES, 2009).

Todos estos procesos se repiten de forma continua en un ciclo interminable (Fig.2). Esta repetición del ciclo del agua ha llevado al hombre a hacer usos extremos del agua. Las mismas actividades humanas han causado efectos negativos sobre el ciclo del agua, esto debido principalmente a la modificación de la superficie terrestre, la contaminación y la sobreexplotación del recurso (USGS, 2009).

1.1.3. Situación del agua en el mundo

Por mucho tiempo, el agua fue considerada como un recurso inagotable, renovable y en la realidad no es así. De toda el agua del planeta solo una fracción mínima es agua directamente utilizable y se encuentra distribuida de manera poco uniforme. Del total de agua de la tierra (Fig.3), que es de 1,386 millones de Km³, alrededor de un 97%, es agua salada. Del agua dulce total, un 77.6% está confinada en los glaciares y la nieve. Un 21.8% del agua dulce está en el suelo. Las fuentes superficiales de agua dulce, como lagos y ríos, corresponden a un 0.6% del agua superficial disponible que es alrededor de 93,100 m³, lo que representa un 1/150 del total del agua. A pesar de esto, los ríos y lagos son la principal fuente de agua que la población usa a diario (UIA, 2008; USGS, 2009).

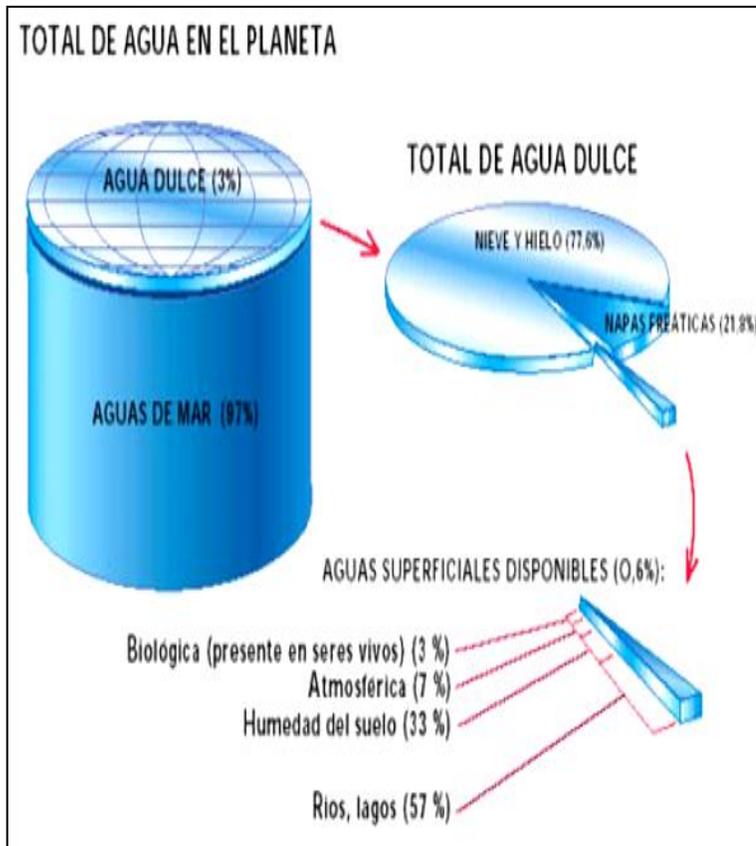


Fig. 3: Distribución global del agua (UIA, 2008).

Sin embargo, un factor importante en la disponibilidad y manejo del agua es lo relativo a la ocurrencia de la lluvia. La cantidad de precipitación pluvial varía a lo largo del mundo dependiendo de muchos factores como la posición geográfica, el cambio de clima, la deforestación, el crecimiento de las ciudades, desvíos de cauces naturales de ríos y lagos entre otros (Fig.4) (PNUMA, 2000).

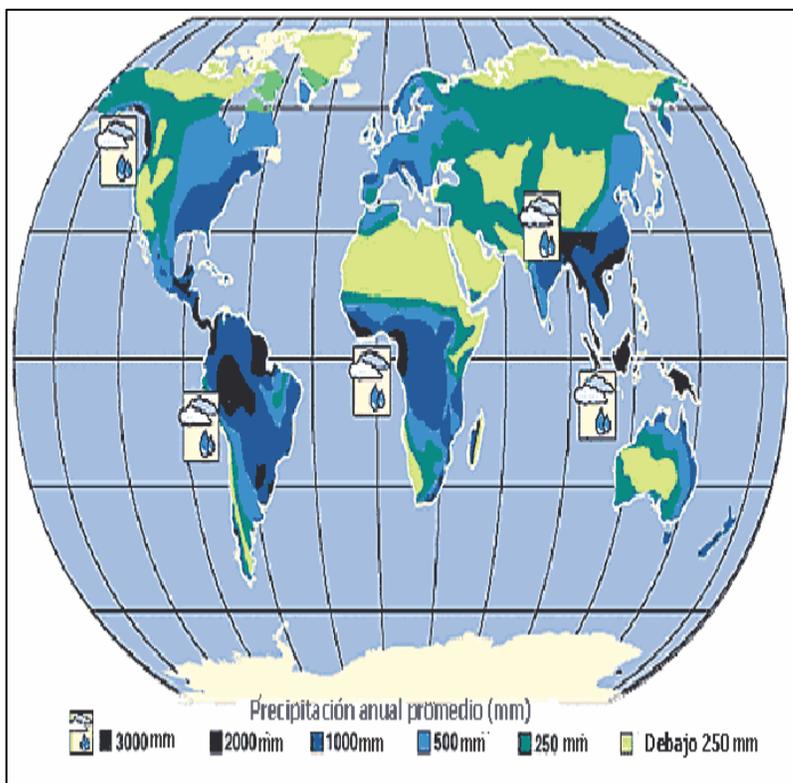


Fig. 4: Precipitación pluvial mundial (USGS, 2009).

Estos factores imponen variaciones espaciales y temporales en la abundancia del recurso al grado tal que siete países (Canadá, Noruega, Brasil, Venezuela, Suecia, Australia y Estados Unidos) concentran alrededor del 90% del agua, mientras que otros como Egipto y Sudáfrica se ven en la necesidad de importar este recurso. El consumo de agua por persona a nivel mundial no es equitativo. Alrededor de 3,400 millones de personas cuentan con una dotación de 50 litros por día, aproximadamente, siendo que

en países desarrollados se tiene un estimado de 400 litros por habitante al día. Para el 2050 la mayor parte del mundo sufrirá una crisis de escasez de agua severa (Fig.5) (UIA, 2008).

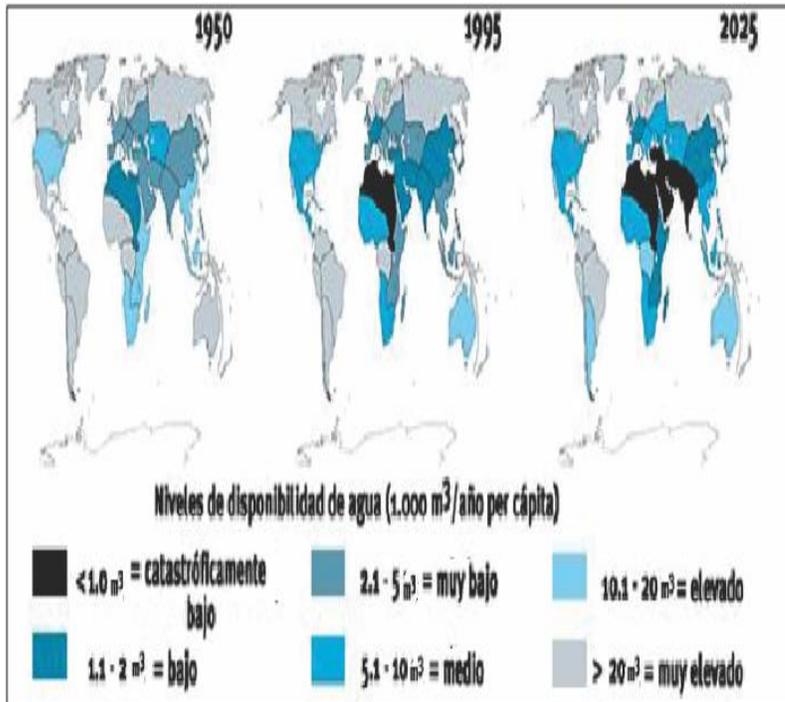


Fig. 5: Consumo anual de agua (UIA, 2008).

1.1.4. Situación del agua en México

México es un país rico en recursos naturales. Aquí, se obtiene el agua para la población de ríos, arroyos y acuíferos del subsuelo. Estos acuíferos son recargados de forma natural en épocas de lluvias. Un primer problema es el hecho de que la época de lluvias

tiene una duración promedio de cuatro meses del año, y la precipitación en esta temporada equivale al 67% de la precipitación anual, lo que propicia que no haya una captación suficiente para cubrir las necesidades del país (Fig.6) (PNUMA, 2000; CONAGUA, 2008).

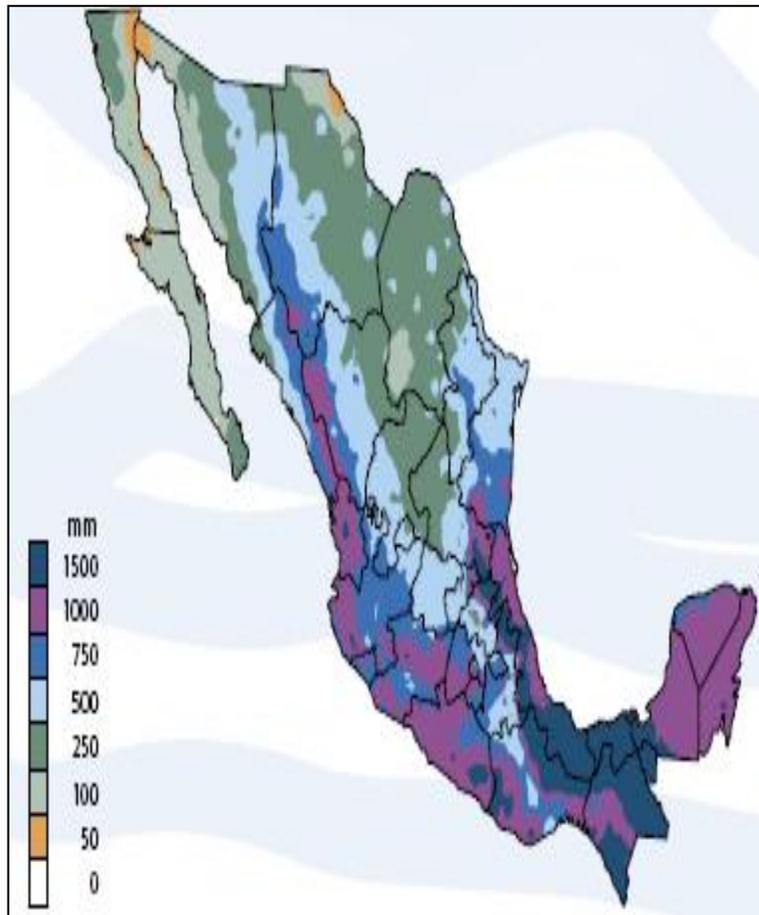


Fig. 6: Precipitación mensual promedio a lo largo del territorio mexicano (CONAGUA, 2008).

Es importante destacar que dos terceras partes del territorio nacional son áridas o semiáridas. Esta situación cobra mayor importancia al considerar que la población del país ha aumentado de 25 millones de habitantes en el año 1950 a 112,336,538 millones de personas registrado en el censo de población del 2010 siendo la mayor concentración en las zonas urbanas que son las que tienen menor disponibilidad de agua. En el estado de México habitan 15,175,862 millones de habitantes, de estos, 511,675 personas habitan en el municipio de Cuautitlán Izcalli. (INEGI, 2010).

En el centro y norte, donde se tiene un 31% de la disponibilidad nacional de agua, se concentra el 77% de la población, situación que contrasta con la zona sureste, donde existe el 69% de la disponibilidad y se ubica 23% de la población. Por otra parte, en el mismo contexto, México en tan solo 56 años disminuyó su disposición per cápita de agua pasando de una disponibilidad de $18,03\text{m}^3$ a $4,416\text{m}^3$ por habitante al año (Fig.7) (CONAGUA, 2008).

Sin embargo, la mayor problemática es el uso que se le da al agua. En lo que se refiere a los usos del agua (Fig.8), el volumen concesionado a Diciembre del 2006 era de 77,321 millones de metros cúbicos. De este volumen, el 77% se destina al sector agrícola, el 14% al público y 9% a las industrias que obtienen agua

de ríos y acuíferos. La superficie con infraestructura de riego es de 6.3 millones de hectáreas con baja eficiencia en los sistemas de conducción, distribución y aplicación del agua, generando grandes pérdidas con elevados costos de operación.

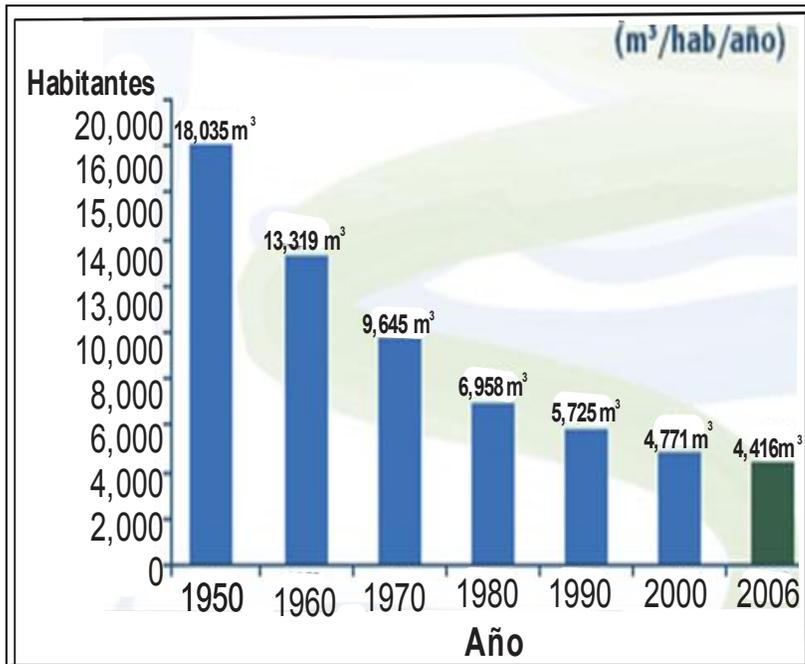


Fig. 7: Disponibilidad del agua en México (CONAGUA, 2008).

Por otro lado, aquella fracción de agua designada a la industria es regresada a los mantos acuíferos con cantidades elevadas de diversos contaminantes, principalmente por las industrias azucareras, químicas, petroleras, petroquímicas, de celulosas, papel, hierro, acero, textil, de alimentos y bebidas (CONAGUA, 2008; UIA, 2008).

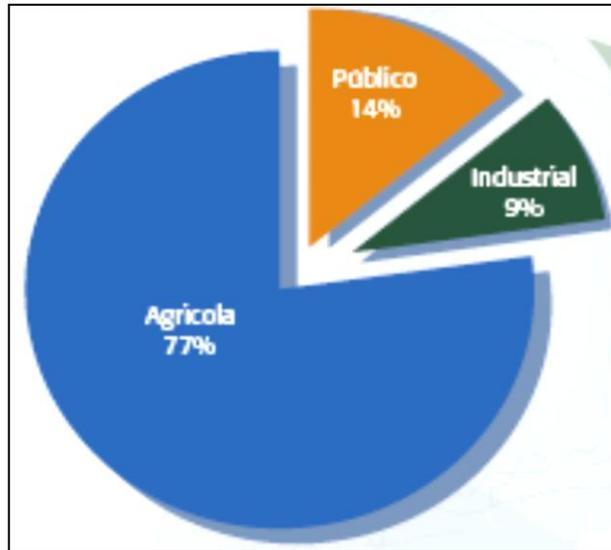


Fig. 8: Distribución del uso del agua en México (CONAGUA, 2008).

1.2. La contaminación del agua

De acuerdo a las Naciones Unidas, el agua se considera contaminada cuando se ve alterada en su composición o estado, directa o indirectamente, como consecuencia de la actividad humana, de tal modo que quede menos apta para uno o todos los usos a que va destinada para los que sería apta en su calidad original. Existen muchas definiciones para la contaminación del agua, en todas se puede destacar que se parte del agua en su estado natural que no necesariamente es pura, también la contaminación del agua se mide en función del uso al que el agua está destinada, y por último, la contaminación del agua es aquella

provocada de forma directa o indirecta por el hombre (Orozco, 2003).

La contaminación del agua y la degradación de los ecosistemas acuáticos afectan directamente la salud humana. El agua contaminada es la principal causa de enfermedad y muerte a nivel mundial. La contaminación microbiana de las instalaciones hidráulicas, la eliminación incorrecta de aguas residuales y residuos animales, son un problema de primer orden y aproximadamente tres millones de personas mueren todos los años en los países en vías de desarrollo, en su mayoría niños (GEO, 2007).

Los contaminantes que afectan al agua modifican su color, turbidez, dureza, sabor y olor. Los principales son (Sans, 1999):

-SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN: son principalmente minerales finos o materia vegetal que no es capaz de sedimentarse. Estos sólidos conducen al desarrollo de depósitos de fango aumentando las condiciones anaeróbicas del medio.

-MATERIA ORGÁNICA: este tipo de materia se mide en términos de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) que representa el grado de consumo de oxígeno por la oxidación microbiana de contaminantes en el agua. Esta materia en niveles elevados causa en el entorno acuático agotamiento de los recursos naturales de oxígeno. La DBO es una medida realista de

la calidad del agua en lo que concierne al consumo de sustancias biodegradables que requieren de oxígeno para su oxidación (Manahan, 2007).

-METALES PESADOS: este tipo de contaminante proviene principalmente de aguas residuales comerciales e industriales. Aunque algunos de estos metales son necesarios para el desarrollo de la vida biológica, si se presentan en niveles elevados pueden interferir en los procesos de depuración y pueden poner en riesgo a los seres vivos dada su alta toxicidad.

-PATÓGENOS: estos microorganismos son principalmente virus y bacterias que pueden afectar negativamente la salud del consumidor.

1.2.1. Tratamiento de agua

La calidad del agua, va ligada directamente con la calidad del medio ambiente de la zona geográfica en conjunto, con la escasez y con la demanda del agua. La sobreexplotación de acuíferos es un problema severo ya que la cantidad de agua extraída es el doble del agua que se recupera y de esta solo un 10% es sometida a tratamiento. De seguir esta tendencia y no tomarse medidas, en poco tiempo no habrá suficiente agua para beber (Carrillo, 2008; Castillo, 2007).

El tratamiento y la distribución del agua es el proceso por el cual el agua se toma de los recursos acuíferos, se convierte en apta para el consumo y entonces se transporta hasta el consumidor. Ésta es la primera mitad del ciclo del agua de consumo humano, antes de que el agua sea realmente utilizada por el consumidor. La segunda mitad del ciclo es la recolección, tratamiento y vertido del agua utilizada, a esta se le conoce como agua residual.

El objetivo del tratamiento del agua es el de producir un adecuado y continuo suministro de agua que es química, bacteriológica y estéticamente agradable para su uso. Específicamente, el tratamiento del agua debe producir agua que sea (Gray, 1994):

-SALUDABLE: no debe contener ningún organismo patógeno o producto químico que pueda ser nocivo para el consumidor.

-LIMPIA: libre de materia suspendida y turbidez.

-INCOLORA E INSABORA: esto es, visualmente transparente y sin sabor para su consumo.

-RAZONABLEMENTE BLANDA: esto para permitir a los consumidores su uso para la higiene personal y el uso doméstico sin el excesivo manejo de detergentes.

-NO CORROSIVA: el agua no debe oxidar las tuberías o facilitar el lixiviado de metales de las tuberías o depósitos.

-BAJO CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA: un alto contenido en materia orgánica facilitará un indeseado crecimiento biológico en tuberías y depósitos de almacenamiento que pueda afectar a la calidad del agua suministrada.

En México, se generan alrededor de 420m³ cada segundo de aguas residuales. De estas, 250m³ son de origen municipal y 170m³ de origen industrial. Estos desechos, principalmente aquellos generados por las industrias en México, provocan una degradación intensa de la calidad del agua, grandes impactos ecológicos en flora y fauna, pérdida del uso natural del agua y una reducción de la disponibilidad por alteración de la calidad (Castillo, 2007).

Un problema grave en nuestro país es que se tiene una baja capacidad de tratamiento. La capacidad instalada para el tratamiento de agua urbana es de 9,952Lt/s pero únicamente se procesan 204,000 litros. La mayor parte del agua es eliminada sin recibir tratamiento, aquella que es tratada se re-usa principalmente en el riego de jardines y la que no es tratada, para riego de productos agrícolas, donde la única medida sanitaria es

restringir el tipo de cultivos a aquellos no rastreros de más de 30 cm (Carrillo, 2008; Castillo, 2007).

En sí, la problemática del agua en México está asociada a usos urbanos, al sector agrícola y al sector industrial, por lo que se debe contar con la participación de todos los sectores para buscar la solución a esta problemática (Castillo, 2007).

1.2.2. Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de agua puede dividirse en tres principales categorías:

- La purificación de agua para uso doméstico.
- El tratamiento de agua para aplicaciones industriales especializadas.
- El tratamiento de las aguas residuales para hacerlas aceptables para su vertido o reutilización.

El tipo y grado de tratamiento dependen fuertemente de la fuente y del uso que se pretende dar al agua. El agua para uso doméstico debe desinfectarse completamente para eliminar los microorganismos que pueden causar enfermedades. El agua que va a usarse en calderas puede contener bacterias pero debe ser muy blanda para evitar incrustaciones por lo cual la dureza es un factor importante. El agua residual que se descarga a un río puede requerir un tratamiento menos riguroso que el agua que va a ser

reutilizada en una región árida. La mayoría de los procesos físicos y químicos usados para tratar el agua involucran fenómenos similares, sin tener en cuenta su aplicación a las tres categorías principales de aguas residuales consideradas. Por consiguiente, después de las introducciones al tratamiento del agua para uso municipal, industrial y vertimiento, se discute cada tipo de proceso de tratamiento según se aplican a todas las categorías (Manahan, 2007)

En las plantas de tratamiento, se agrupan diversas operaciones y procesos unitarios para constituir el tratamiento con el cual se logra la depuración del agua. Básicamente, todo sistema de tratamiento de aguas residuales está constituido por tres fases: tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario. Todas las etapas comprenden procesos físicos, químicos y biológicos (Cheremisinoff, 1995; Gray, 1994; Hammer, 1986; Sans, 1999; Sans, 1999; Leyva, 1998; Spellman, 2000; Manahan, 2007). En la figura 9 podemos observar un esquema general de cómo es aplicado el tratamiento de aguas residuales donde podemos ver un ejemplo práctico de las etapas del tratamiento.

- **Tratamiento primario**: consiste en la eliminación de la materia insoluble como arenas, grasas y espumas. Primero se realiza la eliminación de residuos fácilmente separables para luego homogenizar los efluentes y neutralizarlos, acondicionando

su pH por medio de agentes químicos. Este paso algunas veces es considerado como un pre-tratamiento. Posteriormente, el agua es transportada a estanques donde se le inyecta aire o gas con la finalidad de separar sólidos de baja densidad como grasas y fibras. Una vez separados, el agua se transporta a otro estanque donde se adicionan coagulantes para separar los sólidos en suspensión por sedimentación en base a su densidad para evitar su acumulación en otras partes del sistema (Cheremisinoff, 1995; Gray, 1994; Sans, 1999; Sans, 1999; Manahan, 2007).

- **Tratamiento secundario:** durante esta etapa se elimina por procesos biológicos aerobios la materia orgánica biodegradable medida como DBO. Consiste básicamente en la acción de microorganismos, a los que se añade oxígeno, que degradan la materia orgánica en solución o en suspensión, hasta reducir los niveles de DBO a niveles aceptables. El efluente residual se oxida bioquímicamente bajo condiciones controladas para un desarrollo bacteriano óptimo donde esta proliferación no influya en el medio ambiente. En esta etapa, encontramos procesos fisicoquímicos como la nitrificación del agua y lodos, biológicos, aerobios y anaerobios. En el proceso biológico, las bacterias consumen la materia orgánica en suspensión acelerando los procesos biológicos naturales para obtener sólidos orgánicos estables. A continuación, se somete el agua a otra sedimentación cuya función básica es la de clarificar el agua para después ser

filtrada en filtros de carbón activado que terminan el proceso. A partir de aquí, el agua muchas veces ya es reutilizada como agua de riego o para usos que no demanden una calidad muy estricta (Cheremisinoff, 1995; Gray, 1994; Sans, 1999; Sans, 1999).

- **Tratamiento terciario:** en esta última etapa, se remueven sólidos en suspensión aún presentes, materiales inorgánicos y compuestos orgánicos disueltos. Se considera también la eliminación de productos farmacéuticos, las hormonas sintéticas y naturales, bacterias patógenas, virus o sustancias tóxicas. Generalmente se lleva a cabo una desinfección química utilizando cloro debido a su bajo costo, sin embargo existen otros métodos que pueden ser más efectivos como la ósmosis inversa, electrodiálisis, radiaciones ultravioletas o gamma. Aquí se elimina el 99% de los sólidos y se deja el agua lo más libre posible de impurezas (Cheremisinoff, 1995; Gray, 1994; Sans, 1999; Sans, 1999).

1.2.3. Agentes coagulantes y floculantes

Podemos definir como coagulación al proceso químico por el cual se añade un coagulante químico al agua con el objeto de destruir la estabilidad de los coloides y promover su agregación. Por otro lado, como floculación, al proceso físico de mezclado por medio del cual se incrementa la posibilidad de choque entre partículas y por consiguiente la formación de flóculos.

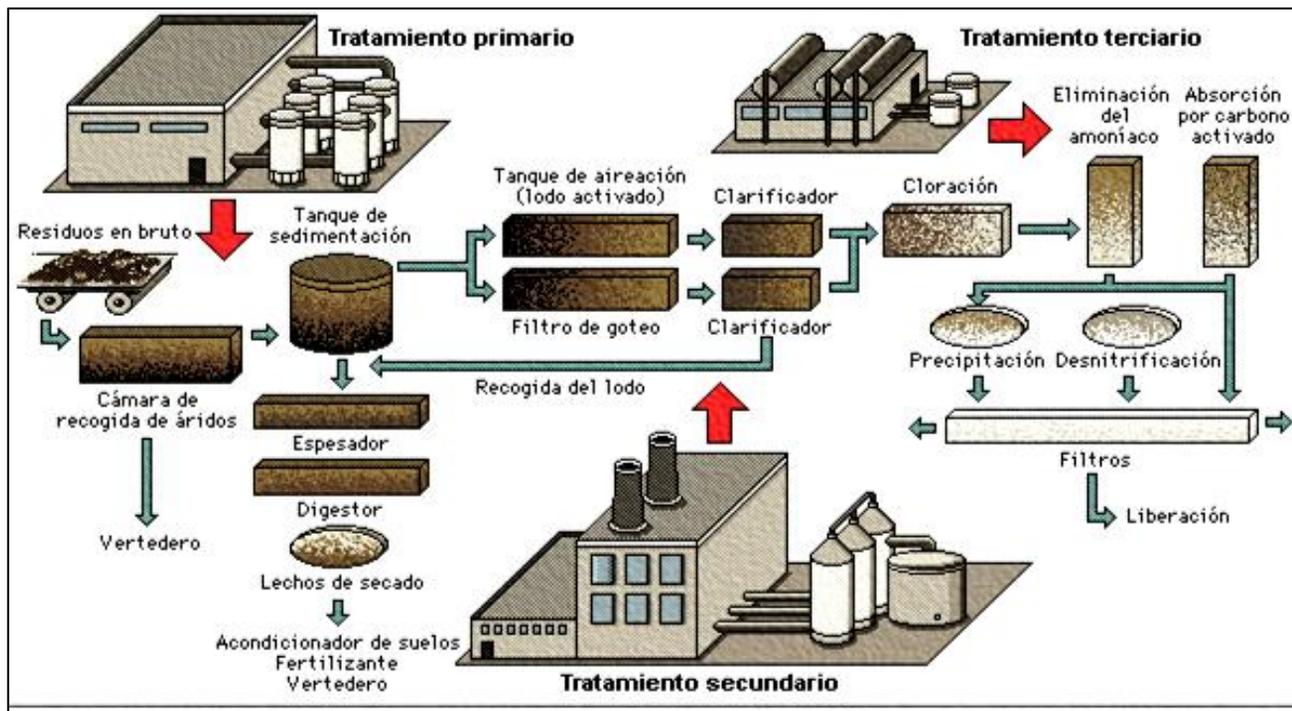


Fig. 9: Esquema general del tratamiento de aguas residuales (Britannica, 2010)

Sin embargo es común referirse con coagulación al proceso de adición de coagulante químico, mezclado y floculación (Romero, 1999; Sans, 1999; Hammer, 1986; Tebbutt, 1999).

Durante el tratamiento primario, las aguas contaminadas son tratadas químicamente para alterar el estado físico de los sólidos disueltos o en suspensión aumentando su área superficial. Esto se logra mediante la adición de coagulantes que permiten se produzca una eliminación posterior por el método apropiado (Sans, 1999; Romero, 1999).

Los *coagulantes* son aquellos compuestos de hierro o aluminio capaces de formar un flóculo y pueden efectuar la coagulación al ser añadidos al agua. Los coagulantes más usados son: sulfato de aluminio, sulfato ferroso con cal, cloruro férrico, aluminato de sodio y cal (Sans, 1999; Romero, 1999).

1.2.3.1. Sulfato de Aluminio

El sulfato de aluminio es el coagulante más usado en el tratamiento de aguas. Es extraído de la roca de Bauxita¹ por una reacción con ácido sulfúrico. El producto comercial tiene la

¹ ***Bauxita***: Roca sedimentaria de origen químico compuesta por alúmina, óxido y sílice (Britannica, 2010).

fórmula $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$, usualmente se encuentra en polvo, molido, terrones, grano y en forma líquida. Este compuesto reacciona con el agua en medio débilmente ácido, neutro o alcalino produciendo hidróxido de aluminio insoluble. La reacción compleja que tiene lugar después de la adición al agua es en general (Romero, 1999; Sans, 1999; Rodriguez, 2003):



El flóculo formado adopta un aspecto gelatinoso que sedimenta lentamente arrastrando a las partículas en suspensión, esto en valores de pH comprendidos entre 6.5 y 8, en concentraciones de 5 a 50 mg/Lt. Sin embargo, tanto el pH como la concentración van a depender directamente del tipo de agua que se trate y se debe tener en cuenta que el aluminio forma complejos estables con azúcares, fluoruros, glicerina entre otros por lo que, la precipitación química en presencia de estas sustancias puede tener bajos rendimientos así como el hecho de que no es posible calcular la dosis de coagulante que se requiere sin efectuarse ensayos previos a nivel laboratorio (Romero, 1999; Sans, 1999; Tebbutt, 1999).

1.3. Filtración

La operación unitaria de filtración es un tipo de operación mecánica que consiste en la separación de los sólidos insolubles

contenidos en una suspensión (*suspensión de alimentación*) mediante el uso de una fuerza impulsora a través de un medio filtrante por cuyas pequeñas perforaciones pasa el líquido y conforme pasa el líquido retiene las partículas sólidas formando una torta (*torta de filtración*) cuya porosidad depende de las características del producto que se vaya a filtrar y de las condiciones de operación. El medio filtrante y la torta de filtración actúan como soporte de los sólidos siendo la torta de filtración la que retiene las partículas sólidas durante la mayor parte de la operación. El producto resultante del procedimiento es conocido como *filtrado* (Aguado, 2003; Brennan, 1980; Toledo, 2007; Geankoplis, 2000).

Los mecanismos del proceso de filtración pueden ser clasificados en tres tipos:

- **FILTRACIÓN SUPERFICIAL:** en este tipo de filtración, el filtrado se hace pasar a lo largo de un medio filtrante cuyos poros son de un gran tamaño, esto hace que el medio tenga menos resistencia al flujo. Esta operación por lo general es muy rápida en un principio pero no es muy eficiente ya que conforme avanza el tiempo de filtración, la velocidad va disminuyendo cuando los sólidos suspendidos tapan los poros. Por otro lado, no se alcanza un espesor considerable ni uniforme de torta y básicamente es utilizado como una especie de tamizado (Toledo, 2007; Ordoñez, 1996; Perry, 1992).

- **FILTRACIÓN EN PROFUNDIDAD:** este tipo de filtración es un proceso en el cual se utiliza un medio filtrante grueso con poros grandes que permiten que los sólidos de tamaño pequeño penetren en el medio filtrante y se depositan ahí dejando que el líquido pase. En esta filtración, las partículas se retienen en el interior del medio hasta que estas tapen el poro deteniendo el flujo del filtrado o bien hasta que las partículas sean presionadas lo suficiente como para atravesar el medio filtrante contaminando el filtrado. La retención de las partículas se debe a la fuerza electrostática de atracción entre ellas y no es muy eficiente en concentraciones elevadas de sólidos. Un ejemplo de esta operación son los filtros de arena (Toledo, 2007; Ordoñez, 1996; Perry, 1992).

- **FILTRACIÓN DE TORTA:** esta filtración es la más común. Aquí, los sólidos filtrados se depositan en la superficie del medio filtrante y se amontonan unos sobre otros para formar una torta cuyo espesor va creciendo conforme avanza la operación (*Fig.10*). La característica más importante que presenta esta operación es la de la formación de conductos que permiten que el flujo, a través de la torta, sea constante. El producto deseado varía dependiendo de las necesidades del operador ya que puede ser la torta, el filtrado o ambos (Perry, 1992; Geankoplis, 2000; Ordoñez, 1996; Aguado, 2003).

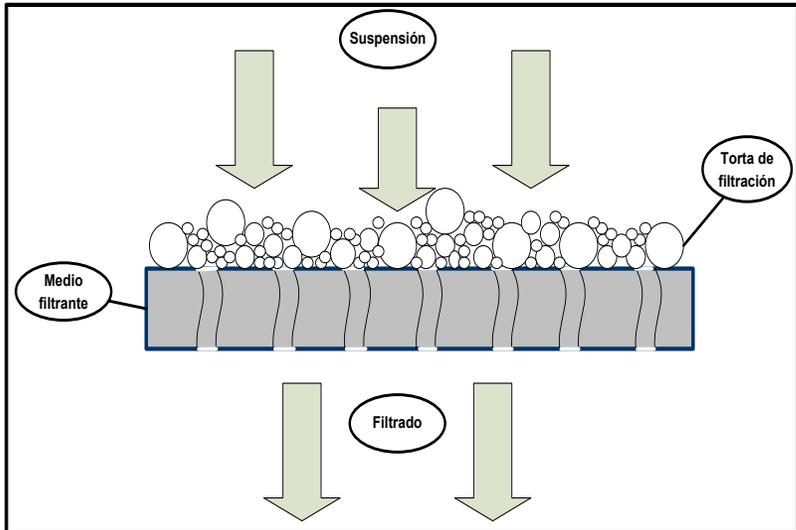


Fig. 10: Filtración de torta (Aguado, 2003; Geankoplis, 2000; Ordoñez, 1996).

En el tratamiento de aguas residuales es la filtración a profundidad la más utilizada. Sin embargo, en este proyecto se buscó utilizar la filtración de torta para el tratamiento específico de efluentes contaminados con goma CMC.

1.3.1. Fuerzas y resistencias presentes

En los momentos iniciales de la filtración de torta (*Fig. 11*), las primeras partículas sólidas que llegan al medio se adhieren a él reduciendo su área superficial y aumentando la resistencia que ofrece al flujo del filtrado. A medida que continúa la filtración y aumenta el espesor de la torta esta se convierte en el medio de

filtración más importante. El filtrado al pasar a través del filtro se encuentra con tres resistencias:

- La ofrecida por las entradas y salidas. Normalmente se consideran despreciables.
- La ofrecida por el medio filtrante.
- La ofrecida por la torta de filtración.

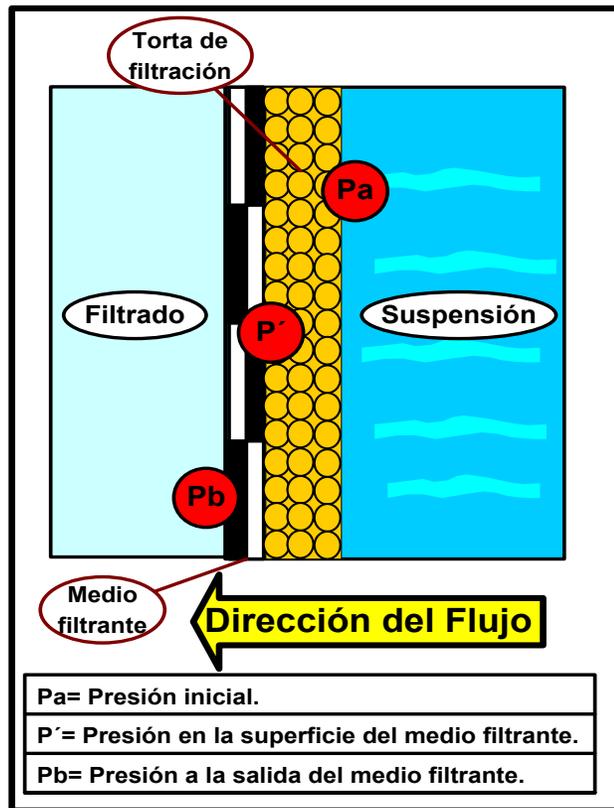


Fig. 11: Corte de una torta de filtración (Geankoplis, 2000; Toledo, 2007; Ordoñez, 1996).

Siendo la diferencia global de presión igual a la suma de las diferencias de presión sobre el medio y la torta, en base a la figura 11 considerando P_a , P_b y P' entonces:

$$(-\Delta p)_T = (-\Delta p)_c + (-\Delta p)_m \quad \text{Ec. (1)}$$

Para vencer la resistencia que oponen la torta y el medio filtrante al flujo de la fase líquida ha de establecerse una diferencia de presiones entre ambos lados del medio filtrante.

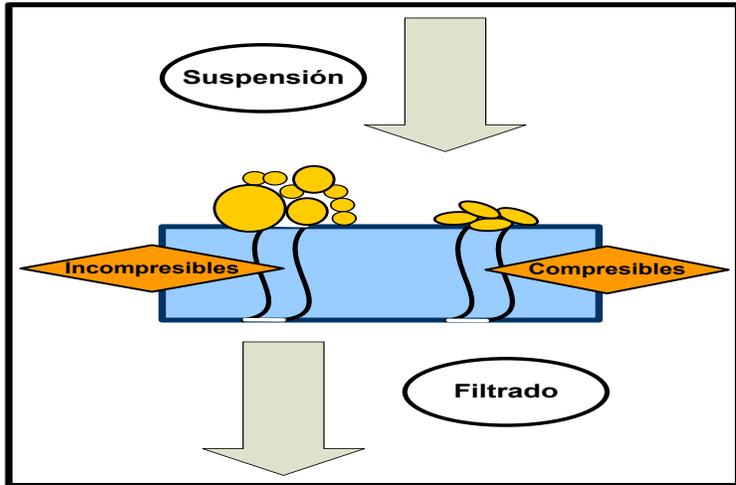


Fig. 12: Tipos de tortas (Aguado, 2003).

Por otro lado, la resistencia que opone la torta está sujeta a la naturaleza del material del sólido suspendido. En este sentido podemos considerar dos tipos de tortas, las *incompresibles* (Fig. 12) que cuentan con sólidos rígidos e indeformables cuya

porosidad permanece constante al someterlo a una diferencia de presión, y las *compresibles* (Fig.12) que son sólidos flexibles y deformables que provocan una disminución de la porosidad de la torta al ser sometida a un aumento de presión disminuyendo con esto la velocidad de filtración (Aguado, 2003).

1.3.2. Ayudafiltros

Cuando se trabaja con partículas compresibles es necesario aumentar artificialmente la porosidad de la torta, esto se logra agregando a las dispersiones materiales rígidos de elevada porosidad que generan una red de canales en la torta que facilita el paso del filtrado y prolonga el ciclo de filtración. Este material es conocido como ayudafiltro o coadyuvantes de la filtración, por lo general son tierras de diatomeas² o bien perlitas³. Las tierras de diatomeas son materiales muy porosos provenientes de vestigios microscópicos del esqueleto de las algas diatomeas. La perlita es

² ***Diatomea:*** (*Bacillariophyceae* o *Diatomeae*) alga unicelular microscópica que vive en agua dulce o marina. Es fotosintetizadora y parte importante del fitoplancton. Tiene una cubierta de sílice (Dióxido de silicio hidratado) llamado frústulo. Su origen se remonta a antes del periodo Jurásico (Britannica, 2010).

³ ***Perlita:*** vidrio volcánico amorfo. Tiende a expandirse al calor. Está compuesto básicamente de Dióxido de silicio (70%-75% SiO). En México es comercializada en su mayoría por la industria Termolita (Britannica, 2010).

un cristal finamente molido de origen volcánico (Aguado, 2003; Toledo, 2007).

Los ayudafiltros se unen a la operación en proporciones variables dependiendo de las necesidades y pueden utilizarse de dos formas. En el primero, se forma una capa protectora previa de ayuda filtro que evite la obturación del medio filtrante y que cubra el área de filtración cuyo espesor dependerá de la densidad volumétrica. Esta forma se conoce como *precapa* (Fig. 13) y es recomendado usarse en cantidades de 5 a 7 Kg por cada metro cuadrado del área de filtración que da un espesor aproximado de 1/16" si la distribución es correcta (Aguado, 2003; Ordoñez, 1996).

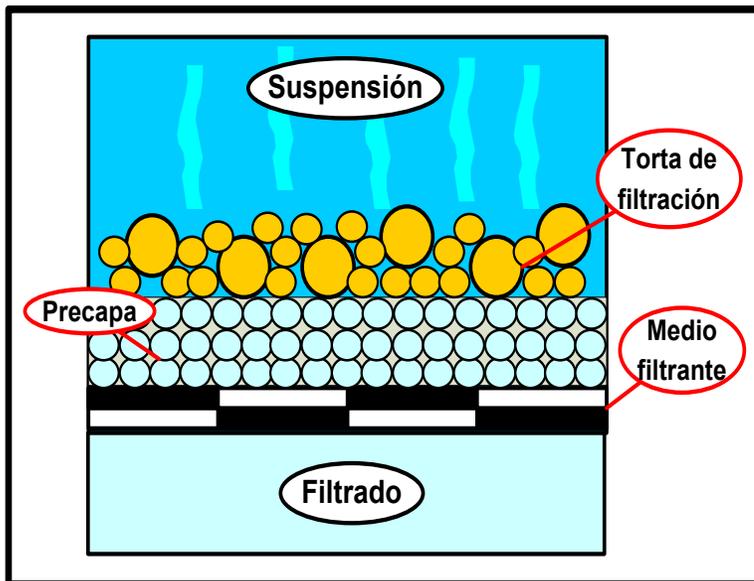


Fig. 13: Adición en Precapa (Geankoplis, 2000; Toledo, 2007; Ordoñez, 1996)

El segundo método es conocido como *dosificación* (Fig. 14), en este, el ayudafiltro se añade a la suspensión de alimentación o durante la filtración en una concentración proporcional a la concentración de sólidos de la suspensión que por lo general se encuentra en un rango de uno a dos veces la concentración de sólidos suspendidos. Ambos son depositados sobre el medio filtrante para formar la torta de filtración (Ordoñez, 1996; Toledo, 2007).

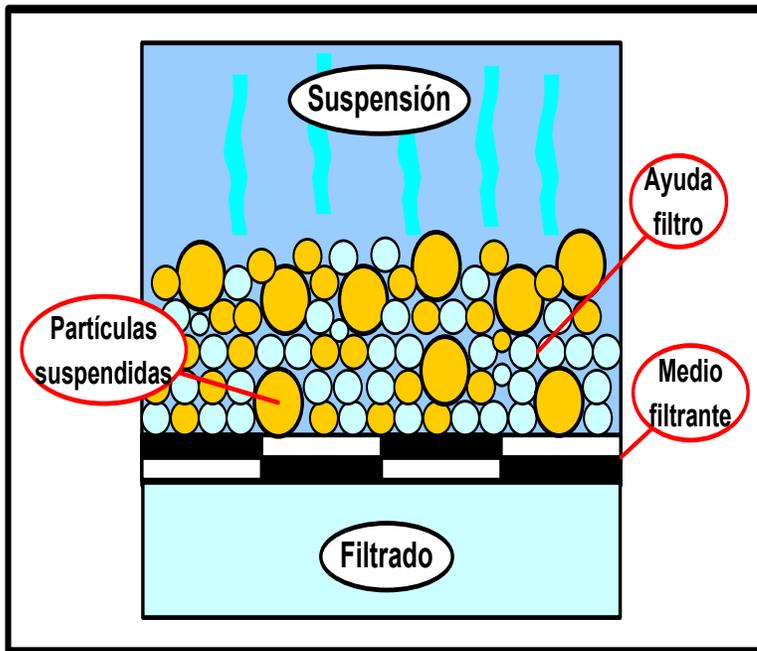


Fig. 14: Adición en Dosificación (Geankoplis, 2000; Toledo, 2007; Ordoñez, 1996).

1.3.3. Tipos de filtros

Existen una gran variedad de equipos de filtración y para seleccionarlos deben tomarse en cuenta factores como viscosidad, densidad, tamaño de partícula, forma, tendencia a la floculación y a la deformación, concentración de sólidos en suspensión, cantidad de material a manejar, entre otros (Earle, 1988; Mc. Cabe, 1991; Aguado, 2003; Geankoplis, 2000).

Para vencer la resistencia que oponen la torta y el medio filtrante a la circulación de la fase líquida se debe establecer una diferencia de presiones entre ambos lados del medio filtrante. Esta necesidad de la operación ayuda a clasificar los diferentes tipos de filtros en tres grupos:

- **Filtros de presión:** en este tipo de filtros, el filtrado se encuentra a presión atmosférica y la suspensión a filtrar a una presión mayor. Un ejemplo es el filtro de placas y marcos.
- **Filtros de vacío:** en este tipo de filtros la alimentación se encuentra a presión atmosférica y el filtrado a una presión inferior.
- **Filtros centrífugos:** en este tipo de filtros la diferencia de presiones se consigue por efecto de la fuerza centrífuga

que se consigue haciendo girar el sistema a elevada velocidad.

Existen una amplia variedad de filtros que pueden ajustarse a esta clasificación. Sin embargo, nos referiremos en el presente trabajo a los filtros de tambor rotatorio.

De los *filtros de vacío*, el más común es el filtro de *tambor rotatorio* cuyo funcionamiento continuo lo hace particularmente indicado para procesos de elevada producción. De modo general, en el filtro se llevan a cabo las operaciones de filtrado, lavado parcial de la torta y un secado parcial llegando hasta la descarga de la misma y del líquido ya clarificado siendo todas estas etapas llevadas a cabo de forma simultánea y automática (Fig. 15).

El material filtrante se soporta sobre un cilindro perforado que gira lentamente, el cual, se encuentra parcialmente sumergido en la suspensión que se desea filtrar. El cilindro se divide en compartimentos radiales independientes que se conectan sucesivamente a una línea de vacío y a una de aire para ayudar a la separación de la torta. Al girar, se forma la torta mientras el filtrado es succionado por medio de vacío. Una vez que el tambor sale de la cuba que contiene la suspensión, la torta ya está formada. Al final, la torta se desprende del medio filtrante por medio de una cuchilla y comienza un nuevo ciclo (Earle, 1988; Mc. Cabe, 1991; Aguado, 2003; Geankoplis, 2000).

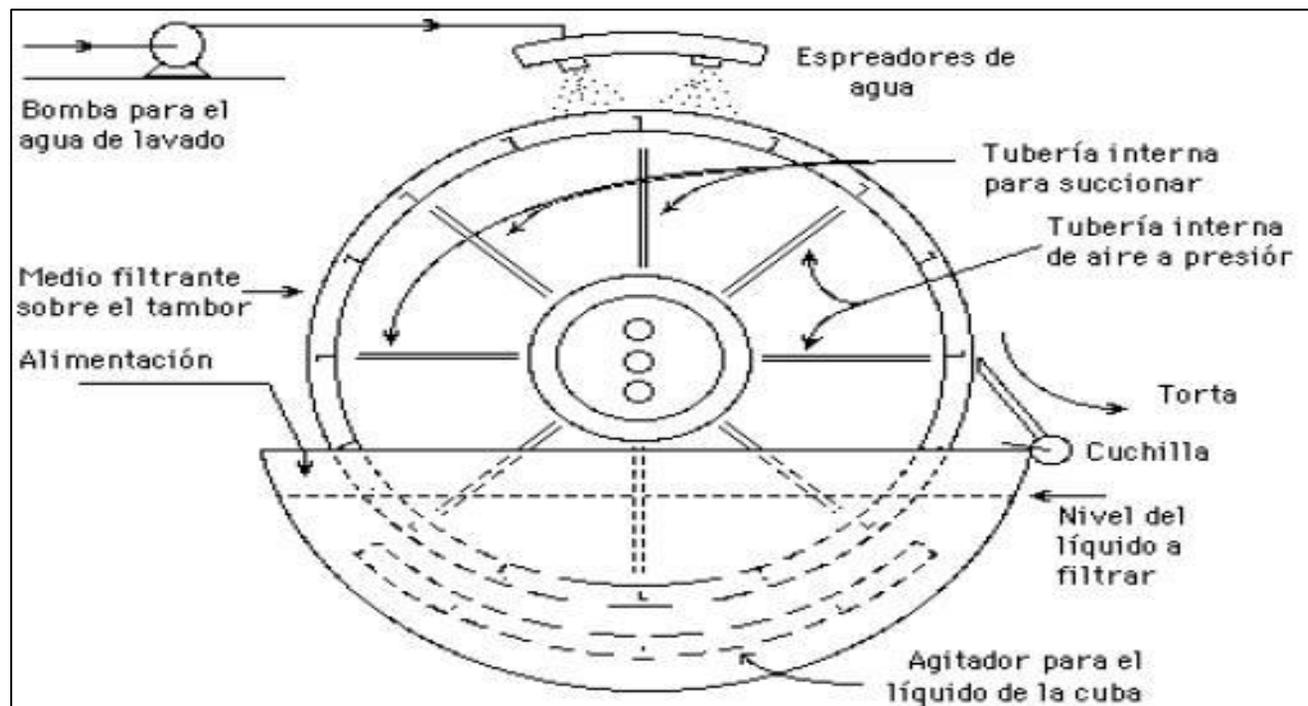


Fig. 15.- Esquema general del funcionamiento del filtro de tambor rotatorio común (Geankoplis, 2000).

El filtro de tambor rotatorio de la Nave 2000 utilizado no cuenta con la zona de lavado. Para este, el ciclo de filtración inicia en la zona sumergida, zona de filtración, la torta formada sale a una zona que se considera muerta para luego pasar a una zona en donde intercambia humedad con el ambiente provocando el secado de los sólidos para pasar a la zona de desprendimiento (Earle, 1988; Mc. Cabe, 1991; Aguado, 2003; Geankopolis, 2000).

1.3.4. Ecuaciones utilizadas en filtración continua

En seguida se presenta la **ecuación general de filtración** (Ec.2) (Earle, 1988; Ordoñez, 1996; Aguado, 2003), donde se definen las constantes de filtración, resistencia específica de la torta, α , y la resistencia del medio filtrante R_m .

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{A(-\Delta p)_T}{(K'V + R_m)\eta} \quad \text{Ec. (2)}$$

en la que A es el área de filtración, V es el volumen de filtrado en m^3 , θ es el tiempo de filtración en s, $(-\Delta p)_T$ es la caída de presión total del sistema en Pa, K' es un factor donde se encuentra implícita la resistencia específica de la torta (α en m/kg), R_m es la resistencia del medio en m^{-1} y η , la viscosidad del filtrado en $Pa*s$.

Para filtración continua, después de cada ciclo el medio filtrante entra limpio por lo que la resistencia del medio se considera despreciable quedando la ecuación general de filtración como sigue:

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{A(-\Delta p)_T}{K'V\eta} \quad \text{Ec. (3)}$$

Es importante comentar que esto solo sucederá cuando no exista ayudafiltro en precapa puesto que, en este caso, la resistencia del medio es sumada a ese espesor de ayudafiltro. Más adelante se presentan las ecuaciones para este caso.

Si se integra esta ecuación considerando que los límites son $V=0$ cuando el $\theta =0$ hasta $V=V_f$ cuando $\theta=\theta_f$ se llega a una ecuación que permite predecir el tiempo de filtración en un filtro continuo (Ec. 4) de la siguiente manera:

$$\theta_f = \frac{K'\eta}{A(-\Delta p)_T} \frac{V_f^2}{2} \quad \text{Ec. (4)}$$

donde θ_f es el tiempo de filtrado del ciclo en s y V_f es el volumen final del filtrado en m^3 .

Considerando que el tiempo de filtración es una fracción del tiempo del ciclo y el área de filtración es el área total, se obtiene

la expresión que nos permite el cálculo de la capacidad del ciclo de filtración en un filtro continuo de tambor rotatorio al vacío, se expresa conforme a la Ec. 5 como:

$$\text{Capacidad} = \frac{\varphi}{360^\circ} \left[\frac{2 (-\Delta p) T \frac{\varphi}{360^\circ}}{\eta \alpha C \theta c} \right]^{1/2} \quad \text{Ec. (5)}$$

Considerando:

$$\varphi = 2 \arccos \left(\frac{d}{R} \right) \quad \text{Ec. (6)}$$

donde φ es el ángulo de sumergencia (Ec.6, Fig. 16), α es la resistencia específica de la torta en m/Kg y θc es el tiempo del ciclo de filtración (s) y en la Ec.6 d , es la distancia desde el centro del tambor a la superficie del líquido (m) y R el radio del tambor (m)(Toledo, 2007).

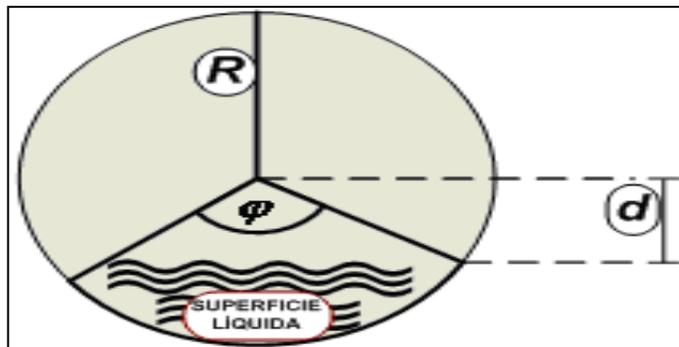


Fig. 16: Esquema del filtro de tambor rotatorio (Geankoplis, 2000; Ordoñez, 1996)

Toledo (2007), propone el siguiente tratamiento que puede ser utilizado para evitar valores negativos y cuando se ha utilizado precapa. En esta propuesta se determina primero la resistencia del medio a partir de la filtración usando una suspensión sin presencia de sólidos, es decir: $C=0$. En este caso el tiempo de filtración quedaría definido con la siguiente ecuación (Ec.7), la cual si considera a la resistencia del medio:

$$\theta_f = \frac{\eta\alpha C}{A^2 2(-\Delta p)_T} V_f^2 + \frac{\eta Rm}{A(-\Delta p)_T} V_f \quad \text{Ec. (7)}$$

Considerando que ahora la caída de presión total es igual a solo la caída de presión en el medio al no existir sólidos, y que:

$$Rm = \frac{(-\Delta p)_m A}{\eta q} \quad \text{Ec. (8)}$$

donde la caída de presión del medio filtrante es $(-\Delta p)_m$ en Pa, el área es A en m^2 , la viscosidad del fluido es η en $(Pa*s)$ y el gasto volumétrico q en m^3/s (Ec.8).

Reacomodando términos, la ecuación del tiempo de filtración se puede expresar como sigue:

$$\theta_f = \frac{\eta\alpha C}{A^2 2(-\Delta p)_T} V_f^2 + \frac{1}{q} V_f \quad \text{Ec. (9)}$$

Y despreciando a alfa (α) entonces:

$$\theta_f = \frac{\eta Rm}{A - (\Delta p)_T} V_f \quad \text{Ec. (10)}$$

donde q es la razón de flujo volumétrico sobre la precapa a la caída de presión usada en la filtración de la suspensión, obtenido a $C=0$ en m^3/s . Este valor se puede obtener realizando pruebas donde se haga fluir únicamente el filtrado a través de la precapa y el medio filtrante, construyendo con los datos obtenidos una gráfica de θ_f vs V_f (Fig. 17), de la cual, la pendiente es igual a $n' = 1/q$ (s/m^3).

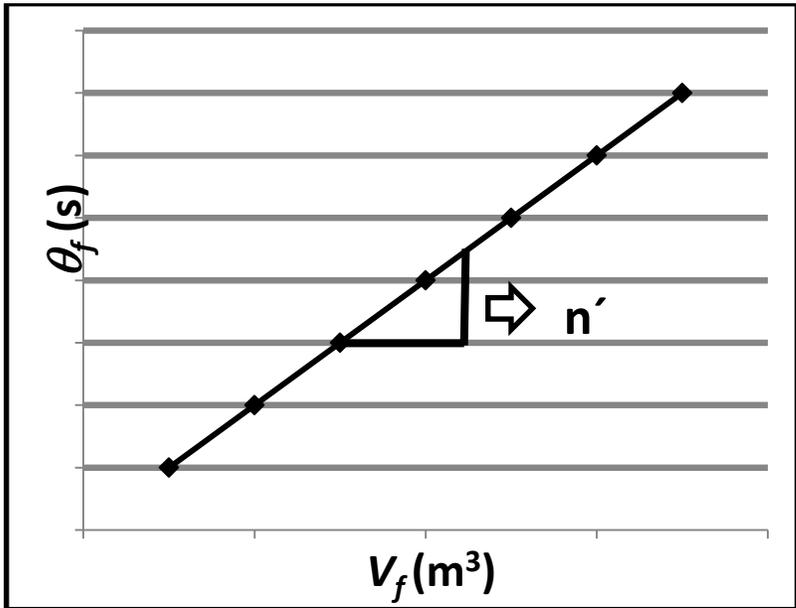


Fig. 17: Gráfica de θ_f vs V_f (Ordoñez, 1996; Toledo, 2007)

La resistencia del medio (***Rm***) es calculada por la ecuación 11 partiendo de la gráfica de ***θ_f vs V_f*** a C=0 usando precapa y medio filtrante:

$$Rm = \frac{n'At(-\Delta p)_T}{\eta} \quad \text{Ec. (11)}$$

La ecuación 9 puede ser expresada conforme a la ecuación 12 como:

$$\theta_f - \frac{V_f}{q} = \frac{\eta\alpha C}{A^2 2(-\Delta p)_T} V_f^2 \quad \text{Ec. (12)}$$

Partiendo de la ecuación 12, la resistencia específica de la torta (***α***) es calculada con datos de volumen y tiempo de pruebas donde se filtra la suspensión usando precapa y medio filtrante. Con los datos se construye una gráfica de ***(θ-V/q) vs V²*** (Fig. 18), de la cual, la pendiente de la recta es ***n''*** en s/m⁶ (Teoh & Tan, 2006; Toledo, 2007) .

$$\alpha = \frac{n'' 2At((- \Delta p)_T)}{\eta C} \quad \text{Ec. (12)}$$

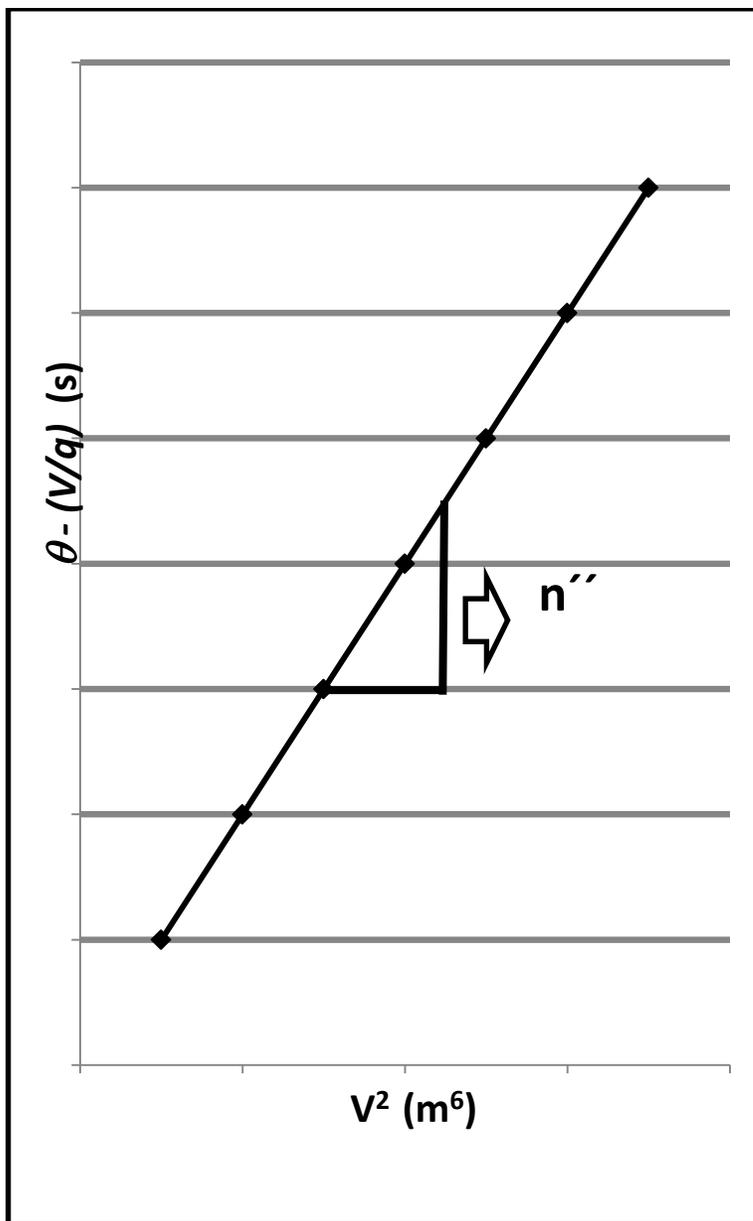
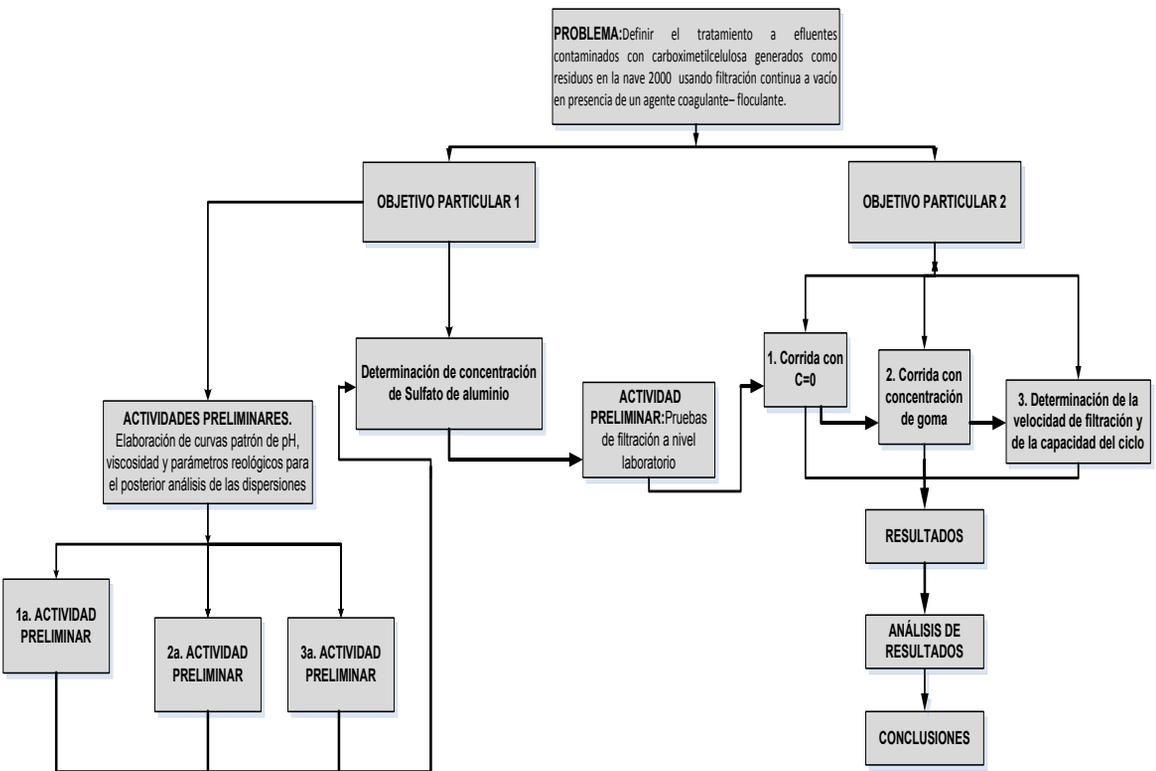


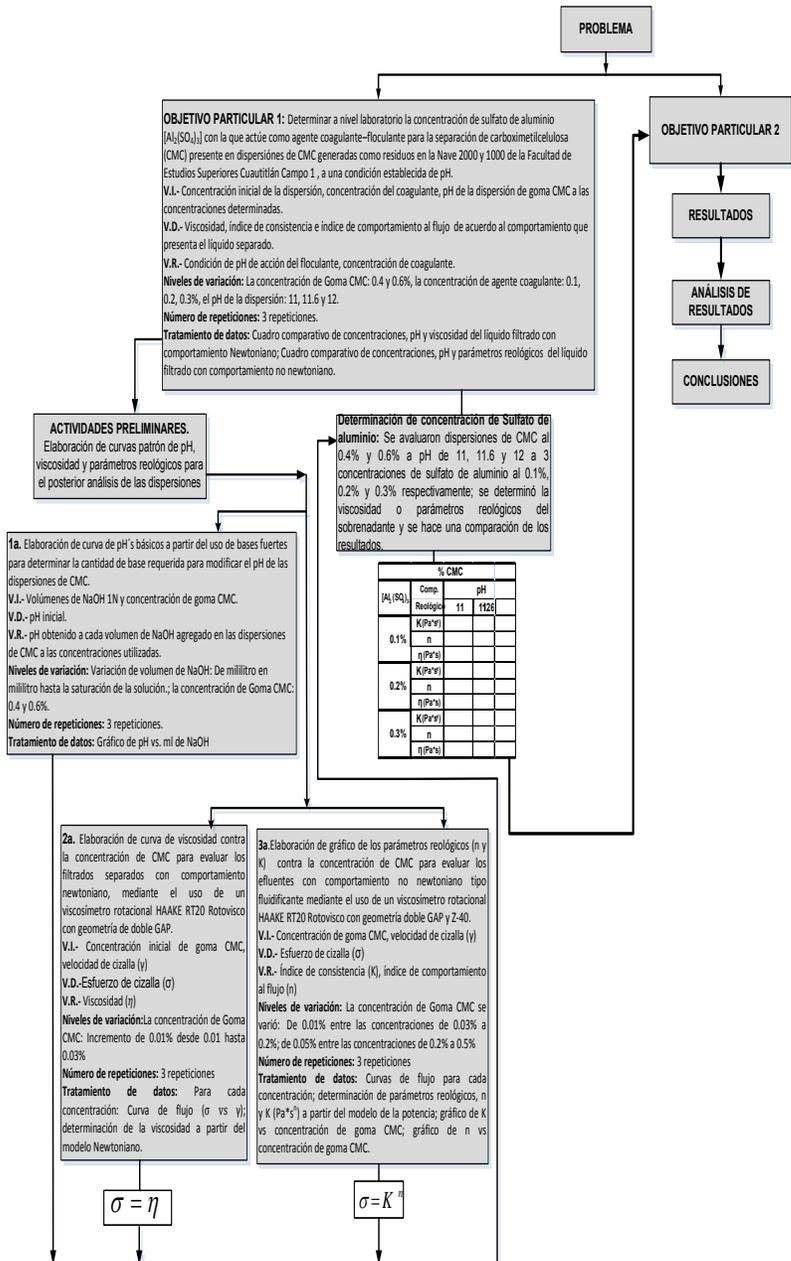
Fig. 18: Gráfica de $(\theta - V/q)$ vs V^2 (Ordoñez, 1996; Toledo, 2007)

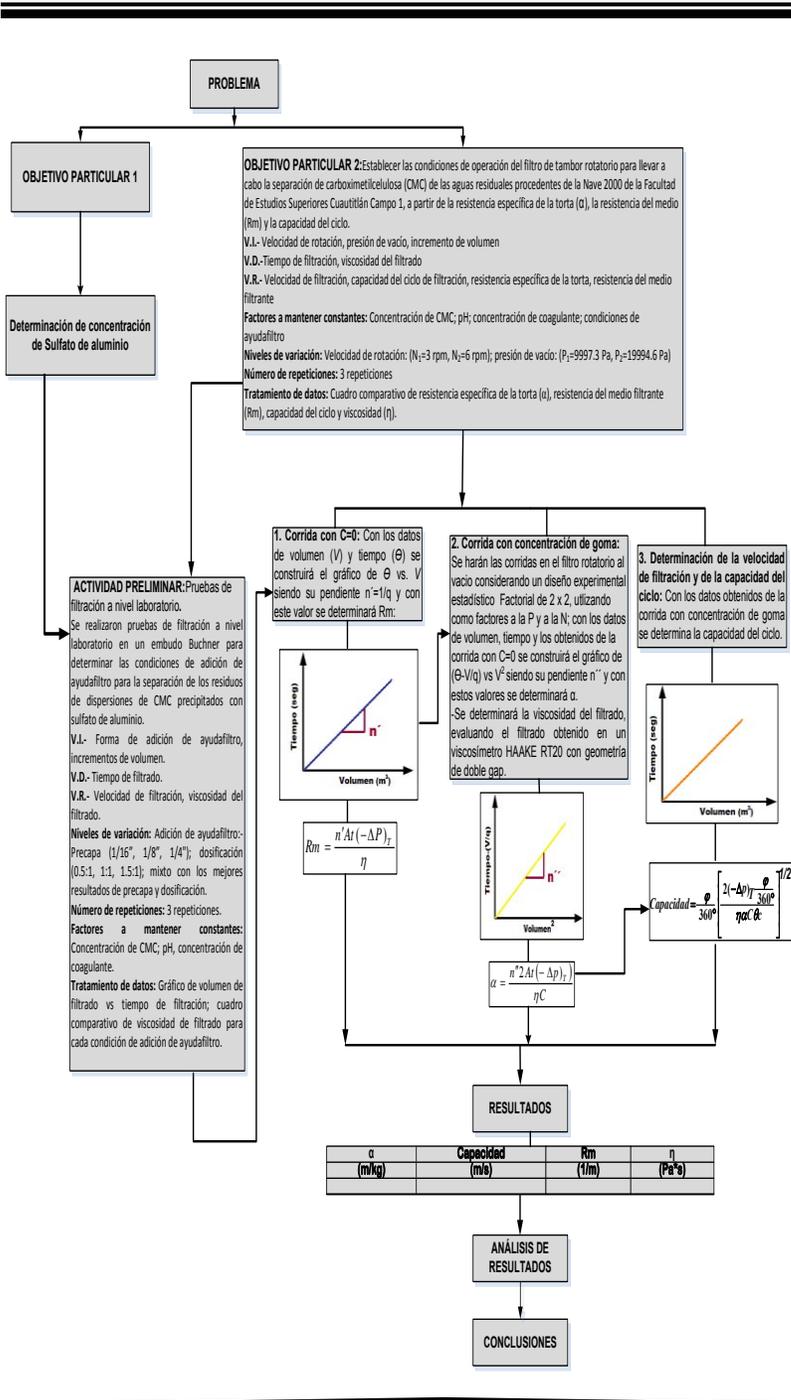
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA

2.1 Cuadro metodológico



Por cada objetivo:





2.2. Desarrollo metodológico

Problema

Definir el tratamiento a efluentes contaminados con carboximetilcelulosa generados como residuos en la nave 2000 usando filtración continua a vacío en presencia de un agente coagulante– floculante.

Objetivo particular 1

Determinar a nivel laboratorio la concentración de sulfato de aluminio $[Al_2(SO_4)_3]$ con la que actúe como agente coagulante– floculante para la separación de carboximetilcelulosa (CMC) presente en dispersiones de CMC generadas como residuos en la Nave 2000 y 1000 de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán Campo 1 , a una condición establecida de pH.

V.I.- Concentración inicial de la dispersión, concentración del coagulante, pH de la dispersión de goma CMC a las concentraciones determinadas.

V.D.- Viscosidad, índice de consistencia e índice de comportamiento al flujo de acuerdo al comportamiento que presenta el líquido separado.

V.R.- Condición de pH de acción del floculante, concentración de coagulante

Niveles de variación.-

- La concentración de Goma CMC: 0.4 y 0.6%
- La concentración de agente coagulante: 0.1, 0.2, 0.3%
- El pH de la dispersión: 11, 11.6 y 12

Número de repeticiones: 3 repeticiones

Tratamiento de datos:

- Cuadro comparativo de concentraciones, pH y viscosidad del líquido filtrado con comportamiento Newtoniano.
- Cuadro comparativo de concentraciones, pH y parámetros reológicos del líquido filtrado con comportamiento no newtoniano.

Metodología:

Para definir las concentraciones de CMC utilizadas durante la experimentación, la información recopilada mostró que los residuos líquidos más comunes y en mayor volumen que se generan como resultado del trabajo experimental en las Naves 2000 y 1000 eran dispersiones de CMC en un rango de

concentración entre 0.3 y 0.9%. Se decidió trabajar con las concentraciones de 0.4 y 0.6 % como representativas y considerando que las concentraciones mayores pueden ser diluidas.

Se realizó una evaluación por triplicado a dispersiones con concentraciones iniciales de 0.4% y 0.6% de CMC, adicionando respectivamente $Al_2(SO_4)_3$ en concentraciones de 0.1, 0.2 y 0.3 % como medio coagulante – floculante, previamente acondicionadas a los pH de 11, 11.6 y 12. Cada muestra fue sometida a una agitación constante por un lapso de 10 minutos con un agitador de propela (Vostrcil & Tesarik, 1972; Hammer, 1986; Tebbutt, 1999; Unda, 2000).

La separación física se presentó como coágulos de goma CMC, los cuales fueron separados del líquido por filtración utilizando un embudo Bushner y un matraz Kitazato, a una presión de vacío de 26664Pa (20cmHg).

Se evaluó el filtrado obtenido de la separación de estas dispersiones de CMC en un viscosímetro rotacional Haake RT20 de cilindros concéntricos. Se determinó el comportamiento reológico de los mismos con la finalidad de determinar las condiciones de pH y concentración del coagulante-floculante que resultaran con la menor presencia de goma en el filtrado (Perry, 1992). El evento

que presentó mejores resultados, se seleccionó para su evaluación en las etapas experimentales posteriores.

Actividades preliminares

Se realizaron curvas de pH de las dispersiones contra volumen de base que permitieran definir la cantidad de base requerida para poder ajustar el pH de los efluentes y evaluar la efectividad del agente coagulante-floculante dentro de un rango de valores de pH definido. Así mismo se prepararon dispersiones de goma CMC en diferentes concentraciones y se determinó la viscosidad en fluidos newtonianos y los parámetros reológicos en fluidos no newtonianos para tener valores de comparación que permitieran evaluar los efluentes una vez separados y corroborar la efectividad del tratamiento de separación; en seguida se presenta el desarrollo experimental utilizado.

Determinación de condiciones de pH

Elaboración de curva de pH's básicos a partir del uso de bases fuertes para determinar la cantidad de base requerida para modificar el pH de las dispersiones de CMC.

V.I.- Volumen de NaOH 1N y concentración de goma CMC

V.D.- pH inicial

V.R.- pH obtenido a cada volumen de NaOH agregado en las dispersiones de CMC a las concentraciones utilizadas.

Niveles de variación.

- Variación de volumen de NaOH: de mililitro en mililitro hasta la saturación de la solución.
- La concentración de Goma CMC: 0.4 y 0.6%.

Número de repeticiones: 3 repeticiones.

Tratamiento de datos:

- Gráfico de pH vs. ml de NaOH

Metodología:

Las condiciones de pH fueron de 10 a 13; se utilizó Hidróxido de sodio 1N que se agregó a las dispersiones de goma CMC al 0.4 y 0.6% respectivamente. Para la determinación de pH se utilizó un potenciómetro marca Hanna Instruments, modelo RI 02895. (Lees, 1982)

Determinación del comportamiento reológico
(Modelo Newtoniano)

Elaboración de curva de viscosidad contra la concentración de CMC para evaluar los filtrados separados con comportamiento

newtoniano, mediante el uso de un viscosímetro rotacional HAAKE RT20 Rotovisco con geometría de doble GAP.

V.I.- Concentración inicial de goma CMC, velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$)

V.D.-Esfuerzo de cizalla (σ)

V.R.- Viscosidad (η)

Niveles de variación.-

- La concentración de Goma CMC: Incremento de 0.01% desde 0.01 hasta 0.03%

Número de repeticiones: 3 repeticiones

Tratamiento de datos:

-Para cada concentración: Curva de flujo (σ vs $\dot{\gamma}$).

-Determinación de la viscosidad a partir del modelo Newtoniano.

Metodología:

Se hicieron dispersiones a diferentes concentraciones de CMC (de 0.01 a 0.03%) y se evaluó el comportamiento reológico de las mismas con un viscosímetro HAAKE RT20 Rotovisco de cilindros

concéntricos; posteriormente, con los resultados obtenidos se realizaron curvas de flujo.

A las concentraciones que presentaron comportamiento newtoniano y que siguen el modelo matemático de la ley de newton (Ec.13) se les determinó directamente la viscosidad de las muestras aplicando una regresión lineal a las curvas donde σ es el esfuerzo de cizalla (Pa), η es la viscosidad de la muestra (Pa*s) y $\dot{\gamma}$ es la velocidad de cizalla (1/s)(Steffe, 1993; Singh, 1998; Rao, 1999; Aguado, 2003; Geankoplis, 2000; Barbosa-Cánovas, 1995).

$$\sigma = \eta \dot{\gamma} \quad \text{Ec. (13)}$$

Conocida la viscosidad de cada dispersión se graficó contra la concentración de goma utilizada; este gráfico permitió establecer la viscosidad de los filtrados obtenidos a nivel laboratorio y a nivel piloto, y que presentaban comportamiento newtoniano.

Determinación del comportamiento reológico **(Modelo de la potencia)**

Elaboración de gráfico de los parámetros reológicos (n y K) contra la concentración de CMC para evaluar los efluentes con comportamiento no newtoniano tipo fluidificante mediante el uso de un viscosímetro rotacional HAAKE RT20 Rotovisco con geometría doble GAP y Z-40.

V.I.- Concentración de goma CMC, velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$)

V.D.- Esfuerzo de cizalla (σ)

V.R.- Índice de consistencia (K), índice de comportamiento al flujo (n)

Niveles de variación.-

- La concentración de Goma CMC se varió:
- De 0.01% entre las concentraciones de 0.03% a 0.2%
- De 0.05% entre las concentraciones de 0.2% a 0.5%

Número de repeticiones: 3 repeticiones

Tratamiento de datos:

- Curvas de flujo para cada concentración.
- Determinación de parámetros reológicos, n y K ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$) a partir del modelo de la Potencia.
- Gráfico de K vs concentración de goma CMC.
- Gráfico de n vs concentración de goma CMC.

Metodología:

A las concentraciones que presentaron comportamiento no newtoniano del tipo fluidificante y que siguieron el modelo matemático de la ley de la potencia donde K es el índice de consistencia ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$) y n el índice de comportamiento al flujo (Ec.14) (Steffe, 1993; Singh, 1998; Rao, 1999; Aguado, 2003;

Geankoplis, 2000; Barbosa-Cánovas, 1995), se obtuvieron los parámetros reológicos aplicando una regresión potencial a las curvas obtenidas.

$$\sigma = K\dot{\gamma}^n \quad \text{Ec. (14)}$$

Como se comentó antes, estos gráficos permitieron compararlos contra los filtrados obtenidos en el trabajo experimental a nivel laboratorio así como a nivel piloto para determinar el contenido de goma en el filtrado final y que tuvieron un comportamiento no newtoniano.

Objetivo particular 2

Establecer las condiciones de operación del filtro de tambor rotatorio para llevar a cabo la separación de carboximetilcelulosa (CMC) de las aguas residuales procedentes de la Nave 2000 de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán Campo 1, a partir de la resistencia específica de la torta (α), la resistencia del medio (R_m) y la capacidad del ciclo.

V.I.- Velocidad de rotación, presión de vacío, incremento de volumen

V.D.- Tiempo de filtración, viscosidad del filtrado

V.R.- Velocidad de filtración, capacidad del ciclo de filtración, resistencia específica de la torta, resistencia del medio filtrante

Factores a mantener constantes:

- Concentración de CMC
- pH
- Concentración de coagulante
- Condiciones de ayudafiltro

Niveles de variación:

- Velocidad de rotación: ($N_1=3$ rpm, $N_2=6$ rpm)
- Presión de vacío: ($P_1=9997.3$ Pa, $P_2=19994.6$ Pa)

Número de repeticiones: 3 repeticiones

Tratamiento de datos:

- Cuadro comparativo de resistencia específica de la torta (α), resistencia del medio filtrante (R_m), capacidad del ciclo y viscosidad (η).

Metodología:

Primero se realizaron las pruebas de filtrabilidad para definir las condiciones de adición del ayudafiltro que se explican adelante en las actividades preliminares.

Se llevó a cabo la separación a nivel piloto de la suspensión de alimentación de CMC (previamente precipitada con el coagulante bajo las condiciones de pH y concentración preestablecidas) en el filtro de tambor rotatorio marca Didacta Italia modelo IC26D (Fig. 16) de la Nave 2000 de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM.

Se realizó un diseño estadístico Factorial (2x2), siendo la Presión de vacío (**P**) de 9997.3Pa (0.1Bar) y 19994.6Pa (0.2Bar) y la Velocidad de Rotación (**N**) de 3RPM y 6RPM.

Se aplicó el tratamiento propuesto por Toledo (2007) que se explicó en los antecedentes, para corridas con precapa, ya que los resultados obtenidos, como se explica en ese apartado, demostraron que era la forma de adición que mejores condiciones de filtración generaba; por lo que se requirió hacer, en primera instancia, una corrida con agua sin sólidos ($C=0$) y ayudafiltro adicionado en precapa con un espesor de 1/8", para determinar **Rm** aplicando la **Ec. 11**.

Se hicieron las corridas a las condiciones de **P** y **N** establecidas con la concentración de sólidos especificada y se tomaron datos de **θ** y **V**, durante la operación de filtración en el equipo. Con los datos obtenidos, se construyó una gráfica de **V vs θ** y se

compararon las curvas para determinar la velocidad de filtración mayor.

Se graficó $(\theta - V/q)$ vs V^2 donde partiendo de la curva se determinó α aplicando la Ec. 12 para con ésta, determinar la **capacidad del ciclo** mediante la Ec. 5.

Los resultados obtenidos de R_m , α , capacidad del ciclo y η se compararon para determinar las mejores condiciones de la operación.

Actividades preliminares: Pruebas de filtración a nivel laboratorio

Se realizaron pruebas de filtración a nivel laboratorio en un embudo Buchner para determinar las condiciones de adición de ayudafiltro para la separación de los residuos de dispersiones de CMC precipitados con sulfato de aluminio.

V.I.- Forma de adición de ayudafiltro, incrementos de volumen.

V.D.- Tiempo de filtrado.

V.R.- Velocidad de filtración, viscosidad del filtrado.

Niveles de variación:

- Adición de ayudafiltro: -Precapa (1/16", 1/8", 1/4")
- Dosificación (0.5:1, 1:1, 1.5:1)
- Mixto: Con los mejores resultados de precapa y dosificación.

Número de repeticiones: 3 repeticiones.

Factores a mantener constantes:

- Concentración de CMC
- pH
- Concentración de coagulante

Tratamiento de datos:

- Gráfico de volumen de filtrado vs tiempo de filtración.
- Cuadro comparativo de viscosidad de filtrado para cada condición de adición de ayudafiltro.

Metodología:

Se utilizó perlita mineral expandida y molida, Filtralite Marca Termolite del tipo AC, como ayudafiltro. Se evaluó sin ayudafiltro y con ayudafiltro en precapa (1/16", 1/8" y 1/4") y dosificación (1:0.5, 1:1 y 1:1.5).

Al filtrar se tomaron datos de tiempo (θ) en segundos requerido para obtener un volumen de filtrado (V) en m^3 ; con los datos obtenidos se realizaron gráficos de V vs θ cuya pendiente representa la velocidad de filtración. Se compararon las curvas obtenidas fijándose las mejores condiciones de ambas formas de adición para posteriormente comparar un método mixto de precapa más dosificación (Vostrcil & Tesarik, 1972; Brennan, 1980; Mc. Cabe, 1991; Toledo, 2007; Ordoñez, 1996; Mayer, 2000).

De igual forma, se evaluó el comportamiento reológico del filtrado por medio del uso de viscosimetría de cilindros concéntricos de los filtrados obtenidos en cada uno de los eventos para determinar la existencia de alguna variación entre las diferentes características de cada uno de los filtrados.

La finalidad fue la de seleccionar el modo de aplicación del ayudafiltro para su uso a nivel piloto y si la adición de éste tenía algún efecto sobre el comportamiento reológico del filtrado.

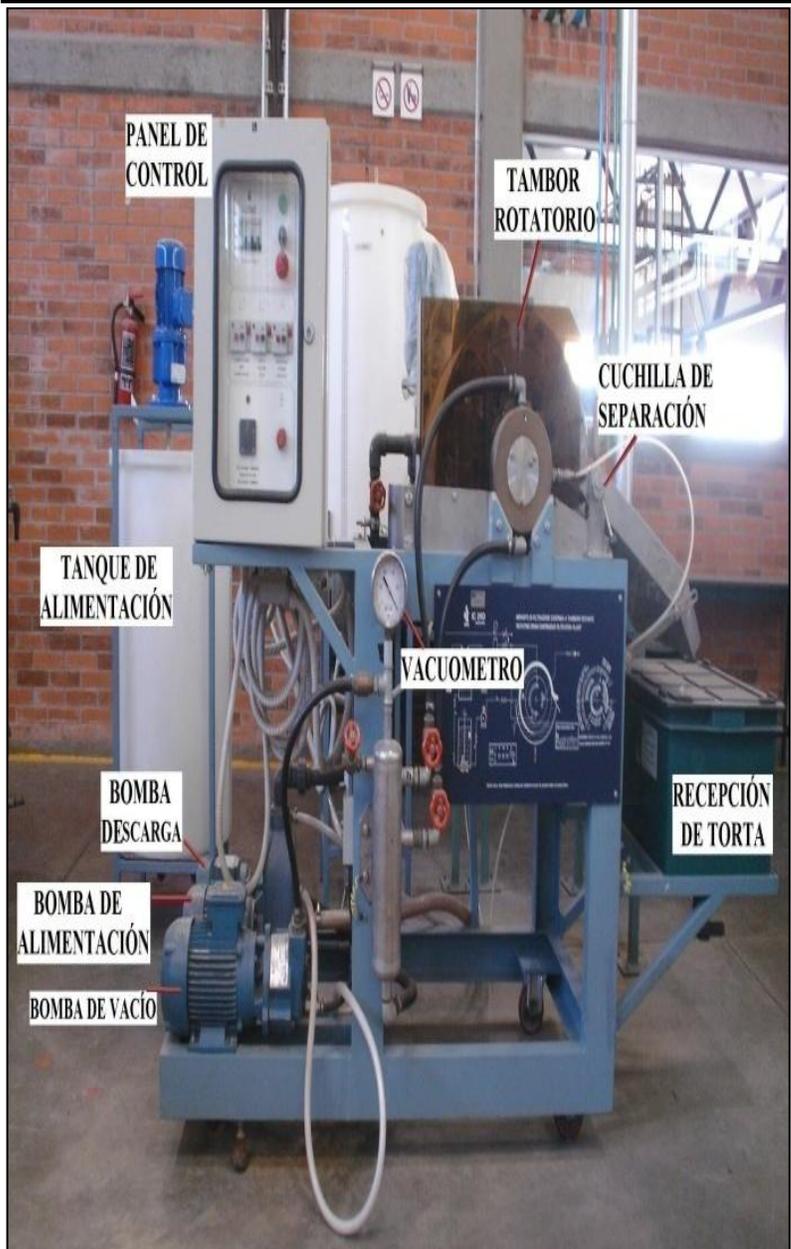


Fig. 16: Filtro de tambor rotatorio utilizado en el proyecto.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

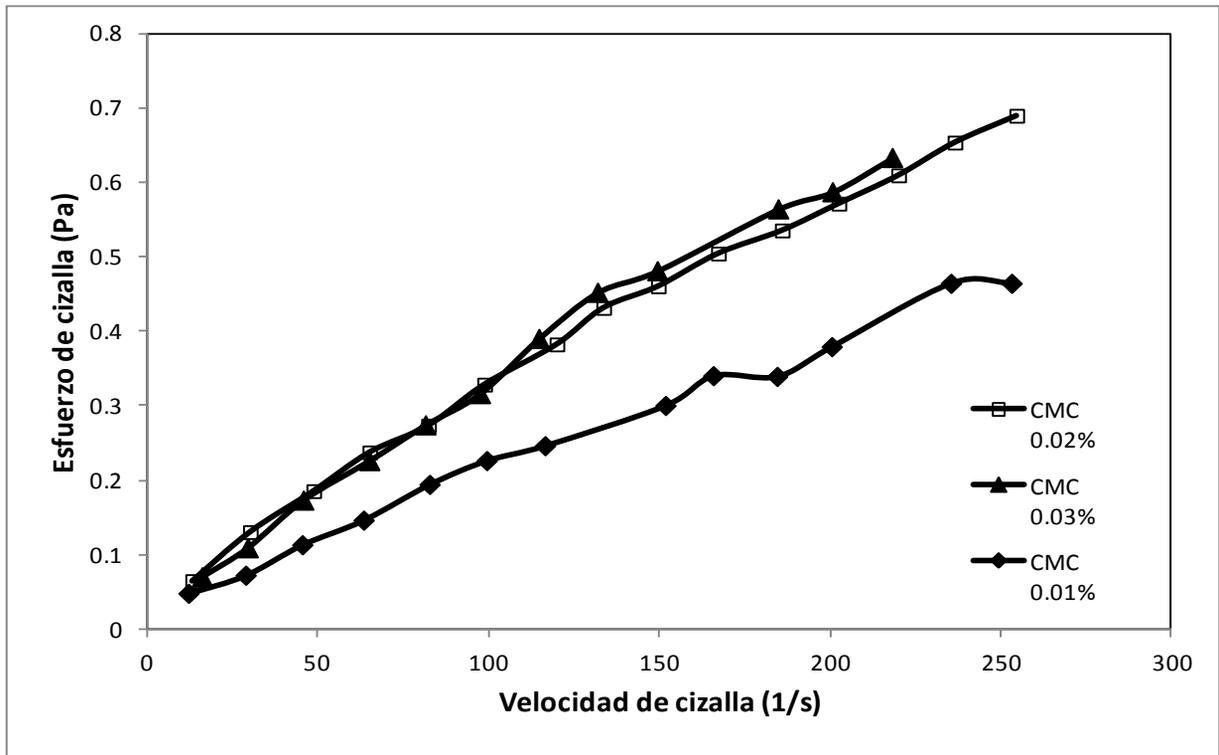
3.1 Objetivo particular 1

3.1.1 Curvas de comportamiento reológico

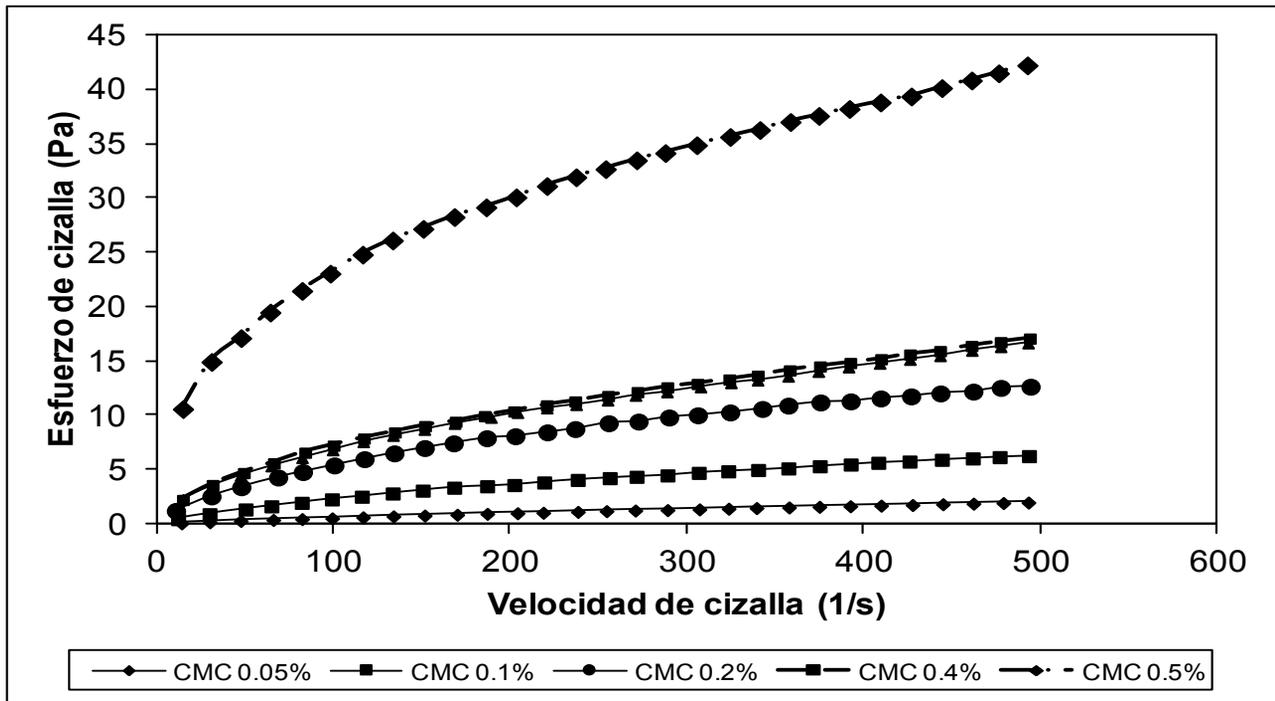
Durante la evaluación del comportamiento reológico se encontró que para las dispersiones con concentraciones de goma CMC en un rango de 0.01% a 0.03% se presentó un comportamiento newtoniano. En la gráfica 1 se presenta la comparación entre concentraciones.

Las concentraciones de CMC en un rango de 0.04% a 0.5% presentaron un comportamiento no newtoniano. La gráfica 2 presenta una comparación de algunas de las concentraciones evaluadas.

A partir de estos gráficos (1 y 2) se determinaron los valores de viscosidad, en el caso de los fluidos newtonianos, y los parámetros reológicos, n y K para cada una de las concentraciones estudiadas. Estos resultados se graficaron contra la concentración de CMC.

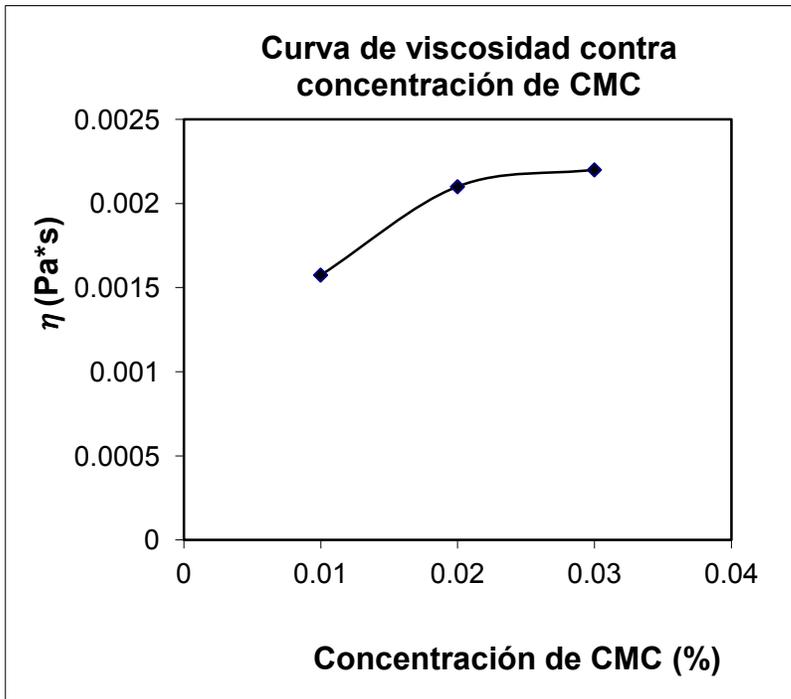


Gráfica 1: Curva de esfuerzo vs velocidad de cizalla para muestras con comportamiento newtoniano.

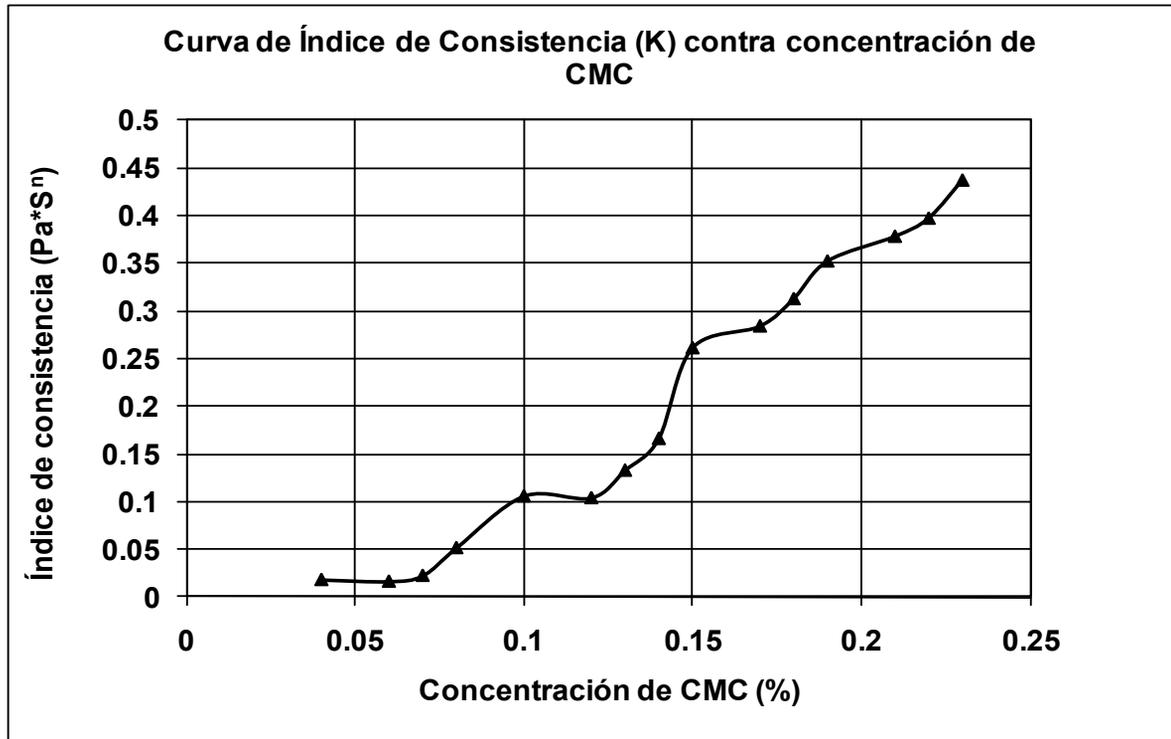


Gráfica 2: Curva de esfuerzo vs velocidad de cizalla para muestras con comportamiento no newtoniano del tipo fluidificante.

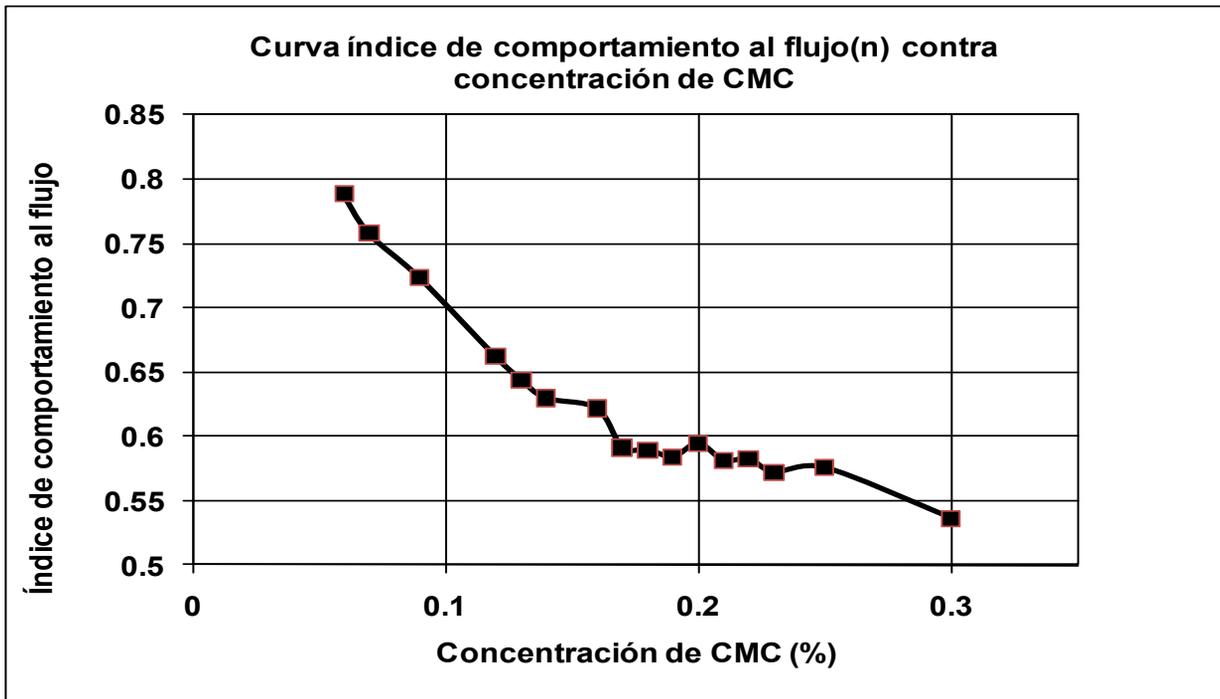
En la gráfica 3 se presenta la viscosidad contra la concentración de CMC para aquellas dispersiones cuyo comportamiento fue newtoniano. En los gráficos 4 y 5 se presenta la relación entre el índice de comportamiento y el índice de consistencia contra la concentración de CMC para aquellas dispersiones de comportamiento fluidificante. Como ya se ha mencionado, estos gráficos permitieron definir la calidad del filtrado obtenido tanto a nivel laboratorio como piloto partiendo de la viscosidad, o de los valores de n y K , según el caso.



Gráfica 3: Curva de viscosidad contra concentración de CMC.



Gráfica 4: Curva de índice de consistencia (K) contra concentración de CMC.



Gráfica 5: Curva de índice de comportamiento al flujo (n) contra concentración de CMC.

3.1.2 Determinación de adición de coagulante

$Al_2(SO_4)_3$

En las Tablas 1 y 2 se presentan en resumen, los resultados obtenidos para las diferentes concentraciones de floculante-coagulante y pH para las dos concentraciones de CMC evaluadas; una imagen de la separación obtenida se muestra en la Fig. 17, en ella se observa claramente el sobrenadante que es el filtrado y en el fondo la goma floculada y separada junto con el $Al_2(SO_4)_3$.



Fig. 17: Apariencia de la muestra tras la coagulación

Tras el análisis de los datos obtenidos para las concentraciones de 0.4% y 0.6% se determinó que los mejores resultados se obtuvieron con pH de 11 y después de la adición de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ al 0.3%, así lo demuestran los resultados ya que para esta condición el filtrado resultó en un fluido newtoniano con viscosidad de $1.2 \text{ E-}03 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (Tabla 1), mientras que para las otras concentraciones del coagulante al mismo pH, resultaron filtrados con menores índices de consistencia, y en el caso del índice de comportamiento al flujo (n), éste se acercó a 1 ($n=1$ representa a un fluido newtoniano como el agua). Estos resultados se obtuvieron a partir de los gráficos 3, 4 y 5. En el caso de la concentración de 0.6%, en todos los casos, el filtrado fue de tipo fluidificante con valores de índice de consistencia mayores (Tabla 2).

Tabla 1: Resultados obtenidos para 0.4% de CMC con la adición de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

0.4% CMC				
$[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3]$	Comp.	pH		
	Reológico	11	11.6	12
0.1%	$K(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	0.68	0.84	0.33
	n	0.54	0.53	0.63
0.2%	$K(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	0.01	0.64	0.45
	n	0.77	0.55	0.6
0.3%	$K(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	---	0.19	0.39
	n	---	0.65	0.61
0.3%	$\eta(\text{Pa}\cdot\text{s})$	1.20E-03	---	---

**(--) No se obtuvieron resultados*

Tabla 2: Resultados obtenidos para 0.6% de CMC con la adición de $Al_2(SO_4)_3$

0.6% CMC				
$[Al_2(SO_4)_3]$	Comp.	pH		
	Reológico	11	11.6	12
0.1%	K(Pa*s ⁿ)	3.09	2.12	1.27
	n	0.43	0.45	0.53
0.2%	K(Pa*s ⁿ)	1.85	2.30	---
	n	0.46	0.47	---
0.3%	K(Pa*s ⁿ)	0.87	1.01	0.50
	n	0.54	0.54	0.61

*(---) No hubo filtrado

La viscosidad de 0.0012 Pa*s (Tabla 1), representa un valor menor que el de la concentración de 0.01% de CMC como se puede comprobar en la gráfica 4. Estas condiciones, fueron las elegidas para pasar a la etapa de filtración a nivel laboratorio y piloto.

3.2 *Objetivo particular 2*

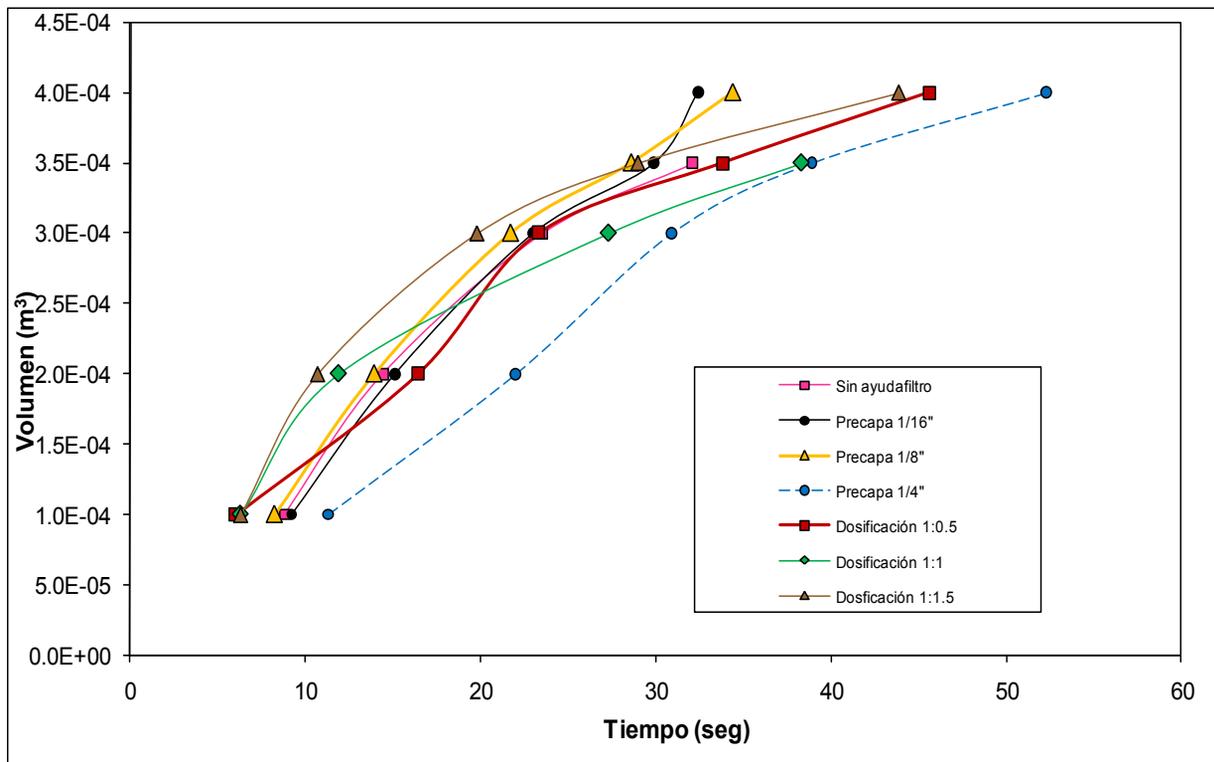
3.2.1 *Filtración a nivel laboratorio*

Los resultados obtenidos al graficar V vs θ para precapa y dosificación presentados en la gráfica 6 demuestran que las mejores velocidades de filtración se obtuvieron con dosificación 1:1.5, 1:1 y precapa de 1/8" siendo la prueba a precapa de 1/4" donde se obtuvieron las menores velocidades.

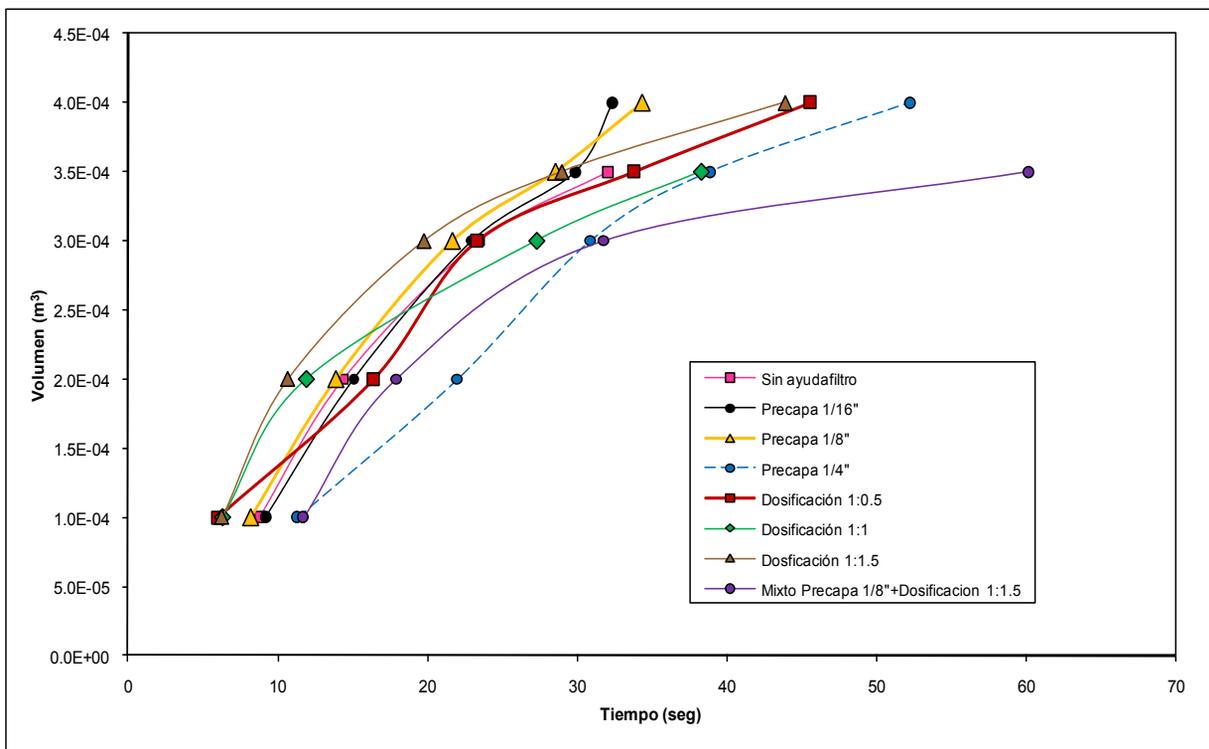
Partiendo de estas observaciones se eligió evaluar en modo mixto utilizando una precapa de 1/8" + dosificación de 1:1.5. Sin embargo, al comparar los resultados se pudo observar que las velocidades de filtración obtenidas en esta modalidad no fueron satisfactorias siendo mejores los resultados por separado como se puede observar en la gráfica 7.

Debido a que la diferencia en la velocidad de filtración entre dosificación de 1:1.5 y 1/8" de precapa no fue significativa, se optó por elegir el uso de una precapa de 1/8" ya que esto garantizaría mantener en mejores condiciones el medio filtrante durante la operación en el equipo.

Para la comparación de la viscosidad de los filtrados obtenidos se realizó un ANOVA con prueba de Tukey al 95% de confianza. Se encontraron diferencias significativas entre los valores de viscosidad, sobre todo al comparar entre la adición de ayudafiltro en precapa, en dosificación o mixto con respecto a la prueba sin ayudafiltro como se puede observar en la tabla 3. Sin embargo, las velocidades de filtración para las condiciones en precapa y dosificación son considerablemente menores. Al hacer la comparación de la calidad de los filtrados esta diferencia no se hace patente, es por esto que se justifica la elección de 1/8" como condición de trabajo.



Gráfica 6: Velocidades de filtración para filtrados de CMC al 0.4% coagulada en condiciones de precapa y dosificación.



Gráfica 7: Velocidades de filtración para filtrados de CMC al 0.4% coagulada en condiciones de precapa, dosificación y mixto.

Tabla 3: Viscosidad de los filtrados a nivel laboratorio.

Adición de ayudafiltro		$\eta(\text{Pa}\cdot\text{s})$
Espesor de Precapa	1/16"	0.0014
	1/8"	0.0013
	1/4"	0.0013
Relación de Dosificación	1:0.5	0.0014
	1:1	0.0013
	1:1.5	0.0013
Mixto	1/8"+1:1.5	0.0013
Sin ayudafiltro		0.0012

3.2.2 Filtración a nivel piloto

Haciendo en este punto una recopilación de las etapas anteriores diremos:

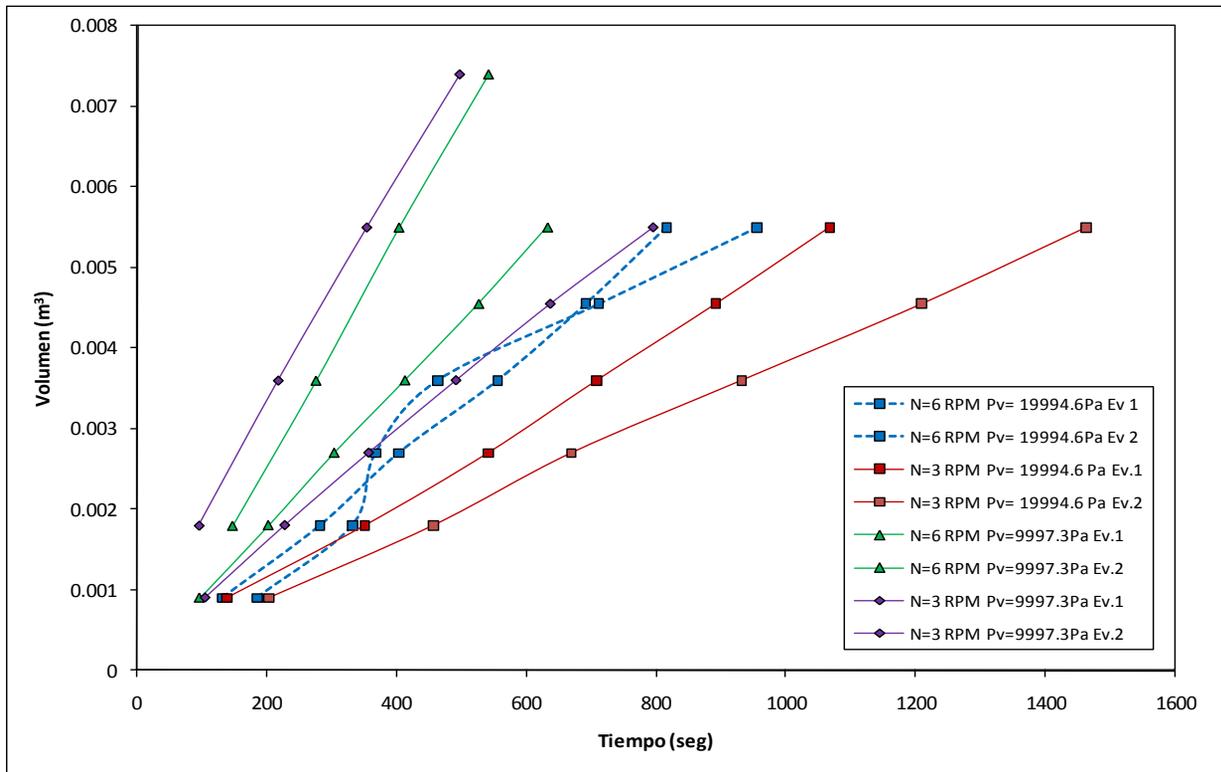
- 1 Se definió la concentración de CMC al 0.4% con un pH 11 y concentración de sulfato de aluminio de 0.3% como la adecuada para evaluar en esta etapa, al dar como resultado un filtrado con comportamiento Newtoniano, siendo esto indicativo de la poca presencia de goma y garantizando una buena separación.**
- 2 Se determinó que la adición de ayudafiltro en precapa de 1/8" es adecuada al presentar altas velocidades de filtración a nivel laboratorio además de mantener en**

buenas condiciones el medio filtrante en el filtro de tambor rotatorio.

Partiendo de estas condiciones, se presenta en la gráfica 8 la comparación entre las velocidades de filtración obtenidas para las diferentes presiones y velocidades de rotación en el filtro de tambor rotatorio. En ella se puede observar que para ambas velocidades de rotación del tambor (3 y 6 RPM), la presión de vacío de 9997.3 Pa (0.1 Bar) mostró los mejores resultados. La condición menos favorable para el sistema fue la velocidad de 3 RPM a una presión de 19994.6 Pa. Este hecho evidenció la tendencia de los sólidos a la compresibilidad ya que con el aumento de presión la velocidad de filtración disminuyó.

En la tabla 4 se presenta un resumen de los resultados obtenidos para la resistencia del medio filtrante (**R_m**), la resistencia específica de la torta (**α**) y la capacidad del ciclo de filtración para cada condición de operación evaluada.

Cabe aclarar que la presencia de resistencia del medio filtrante se debe a que se utilizó un sistema con precapa, por lo que no era posible considerarla despreciable a pesar de utilizar un equipo continuo. Nuevamente se puede ver que las resistencias más grandes se encontraron en condiciones de presión de 0.2 Bar (19994.6 Pa), en especial a 3 RPM.



Gráfica 8: Velocidad de filtración para eventos realizados a nivel planta piloto.

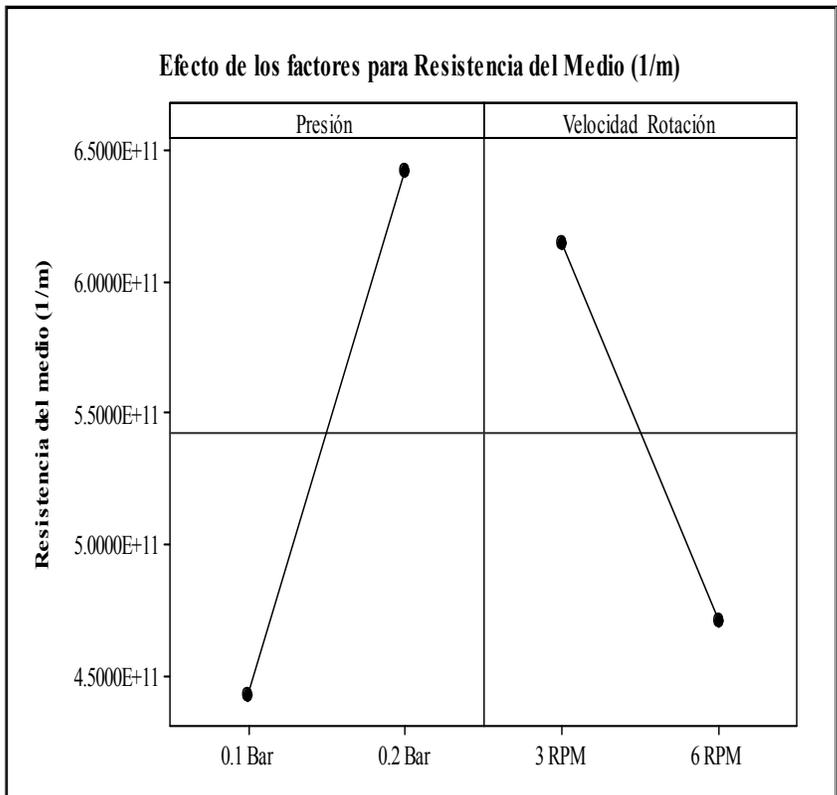
Tabla 4: Comparación de resultados entre los diferentes niveles de variación.

		<i>Rm</i>	α	<i>Capacidad</i>
		(1/m)	(m/Kg)	(m/s)
N= 3 RPM P= 9997.3 Pa	Ev. 1	4.99E+11	1.22E+13	8.48E-09
	Ev. 2	4.90E+11	1.27E+13	6.59E-09
N= 6 RPM P= 9997.3 Pa	Ev. 1	3.77E+11	1.22E+13	6.07E-11
	Ev. 2	4.07E+11	8.64E+12	6.69E-11
N= 3 RPM P= 19994.6 Pa	Ev. 1	6.96E+11	4.67E+13	4.27E-09
	Ev. 2	7.74E+11	7.74E+13	2.83E-09
N=6 RPM P= 19994.6 Pa	Ev. 1	5.40E+11	3.57E+13	5.59E-09
	Ev. 2	5.59E+11	5.16E+13	4.29E-09

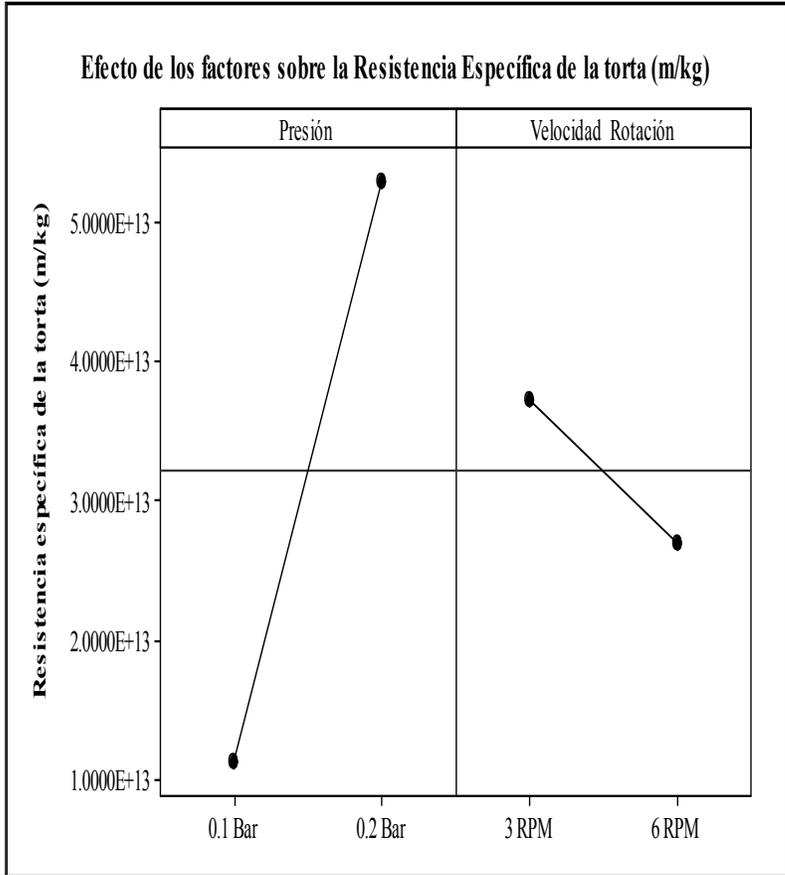
Los resultados del análisis estadístico evaluado en MINITAB 14 confirmaron que la presión fue determinante en la operación tanto para la resistencia de la torta como para la del medio. La mayor presión (19994.6 Pa) generó las mayores resistencias causando una disminución de la velocidad de filtración.

En la gráfica 9 se presentan los efectos para la resistencia del medio (R_m); la línea horizontal es la media. Entre más inclinada es la recta con respecto a la media, el efecto de la variable tiene más influencia; en este caso se observa que la presión resultó en mayor significancia; sin embargo, la velocidad de rotación también tuvo un efecto importante siendo 3 RPM la condición menos favorable.

Con respecto a α , el efecto de la velocidad de rotación fue mucho menor como se muestra en la gráfica 10. Finalmente, con respecto a la capacidad del ciclo de filtración, observamos en la gráfica 11 que la velocidad de rotación fue el factor decisivo para la operación contrastando así con los resultados de α y R_m . La condición más favorable fue a 6 RPM, esto debido a que a mayor velocidad, el espesor de la torta es menor por área.

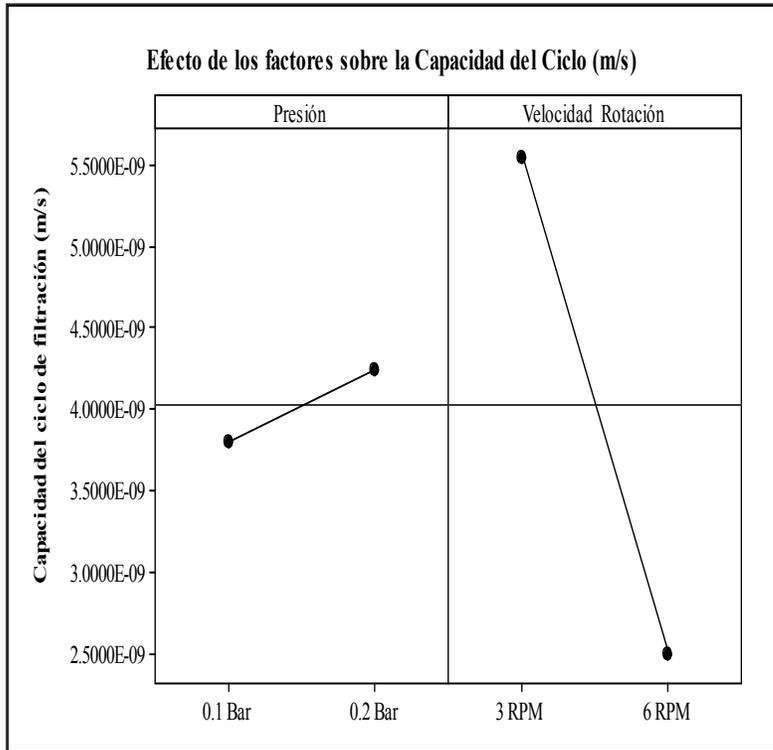


Gráfica 9: Resultados estadísticos para R_m .



Gráfica 10: Resultados estadísticos para α .

Para la comparación de la viscosidad de los filtrados obtenidos se realizó un ANOVA con prueba de Tukey al 95% de confianza. No se encontraron diferencias significativas entre los valores de viscosidad a todas las condiciones de operación del filtro piloto como se puede observar en la tabla 5.



Gráfica 11: Resultados estadísticos para Capacidad del ciclo de filtración.

Tabla 5: Viscosidad de los filtrados a nivel piloto

		η (Pa*s)
N= 3 RPM P= 9997.3 Pa	Ev. 1	1.25E-03
	Ev. 2	
N= 6 RPM P= 9997.3 Pa	Ev. 1	1.23E-03
	Ev. 2	
N= 3 RPM P=19994.6 Pa	Ev. 1	1.20E-03
	Ev. 2	
N= 6 RPM P=19994.6 Pa	Ev. 1	1.20E-03
	Ev. 2	

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES

Tras el análisis de los resultados obtenidos podemos concluir que:

Es posible la separación de carboximetilcelulosa (CMC) del agua en la que se encuentra disuelta, realizando previamente una separación química con sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) al 0.3% con un pH de 11 y obteniéndose mediante filtración un fluido newtoniano con una viscosidad muy semejante a la del agua.

Por otro lado, podemos decir que para concentraciones mayores de goma CMC la recomendación sería su dilución para hacer la separación más sencilla y para concentraciones menores las condiciones encontradas pueden ser punto de partida.

Las condiciones de operación del filtro de tambor rotatorio aplicado a la separación de carboximetilcelulosa (CMC) coagulada-floculada con sulfato de aluminio al 3% son más favorables cuando se aplican presiones de vacío bajas en conjunto con velocidades de rotación del tambor altas. De forma práctica, se encontró que al utilizar una presión de 9997.3 Pa, una N de 6 RPM, una precapa de 1/8" y un pH 11 se obtienen resultados más favorables para *Velocidad de filtración*, R_m , α , *capacidad de ciclo de filtración* sin influencia significativa en la viscosidad del filtrado.

El efecto de la presión sobre las resistencias deja ver la influencia de la compresibilidad de los sólidos, por lo que se recomienda utilizar bajas presiones para su filtración.

Podemos decir que la aplicación de este sistema es viable para un primer tratamiento de aguas residuales obtenidas de aquellas industrias alimentarias donde se utilicen gomas como medio espesante, incluso medios diferentes a la goma CMC únicamente adaptando esta metodología.

En conclusión, esta experimentación es aplicable al tratamiento de aguas residuales de la Nave 2000 de alimentos de la FES Cuautitlán campo I permitiendo que la separación se haga de forma continua. Esto abre un camino para la realización de proyectos académicos y de investigación con un bajo impacto en la contaminación ambiental de México.

BIBLIOGRAFÍA

- **Aguado, J. (2003).** *Ingeniería de los alimentos Vol. I y II.* España: Síntesis.
- **Barbosa-Cánovas. (1995).** Instrumentation for the rheological characterization of foods. *Food science and technology International* , 3-17.
- **Bouso, J. L. (14 al 16 de Febrero 2006).** 2° Seminario Internacional. Minería, Medio ambiente y ordenamiento territorial. . *El agua y los agregados.* Colombia.
- **Brennan, J. (1980).** Filtración por membrana. En J. Brennan, *Las operaciones de la ingeniería de los alimentos.* (págs. 121-154). España: Acribia.
- **Britannica, E. (5 de Diciembre de 2010).** <http://www.britannica.com>. Recuperado el 2010, de <http://www.britannica.com>
- **Camargo, A. (Enero de 2000).** *Análisis elemental y fisicoquímico del agua residual de la UNAM campus Cuautitlán previo a su tratamiento en una planta piloto.* México: Tesis UNAM.

-
-
- **Carrillo, I. (21 de Abril de 2008).** Urgente tratar el agua en México para su reutilización. *Gaceta UNAM*, pág. 8.
 - **Castillo, I. (27 de 08 de 2007).** *INE*. Recuperado el 20 de Enero de 2009, de Instituto Nacional de Ecología: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/estudios/397/castillo.html>
 - **CEGESTI. (2002).** *CEGESTI*. Recuperado el 2008 de Febrero de 2008, de Ahorro del agua en el lavado de recipientes con goma de base acuosa.: http://www.cegesti.org/agace/documents/ejemplos/caso_11.pdf
 - **Cheremisinoff, P. (1995).** *Handbook of water and wastewater treatment technology*. U.S.A.: Marcel Dekker.
 - **CONAGUA. (2008).** *Programa Nacional Hídrico*. México: SEMARNAT.
 - **Earle, R. (1988).** *Ingeniería de los Alimentos. (Las operaciones básicas del procesado de los alimentos) 2a. Ed.* España: Acribia.
 - **Fennema, O. (2000).** Agua y Hielo. En O. Fennema, *Química de alimentos* (págs. 19-109). España: Acribia S.A.

-
-
- **Fennema, O. (2000).** Capítulo 2: Agua y Hielo. En O. Fennema, *Química de los alimentos* (2a Ed. ed., págs. 19-109). España: Acribia S.A.
 - **Geankoplis, C. (2000).** *Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3a Ed.* México: Editorial CECSA.
 - **GEO. (20 de Octubre de 2007).** *Global Environment Outlook.* Recuperado el 15 de Noviembre de 2008, de PNUMA:
http://www.unep.org/geo/geo4/media/fact_sheets/spanish/ES-Fact_Sheet_6.pdf
 - **Gray, N. (1994).** *Calidad del agua potable.* España: Acribia.
 - **Hammer, M. (1986).** *Water and wastewater technology 2a Ed. /.* U.S.A.: John Wiley and Sons Inc.
 - **Helman, J. (1980).** Filtración en profundidad. En J. Helman, *Farmacotecnia Teórica y Práctica* (Vol. Tomo III, págs. 853-881). México: Cia. Editorial continental S.A. de C.V.
 - **IES. (30 de Octubre de 2009).** *anabarco.* Recuperado el 10 de Noviembre de 2009, de <http://anabarco.files.wordpress.com/2007/01/ciclo-del-agua.jpg&imgrefurl=http://funfairizpisua.blogspot.com/200>

9/10/el-ciclo-del-agua_8552.html&h=484&w=611&sz=120&tbnid=Earsr8nIPLoJdM:&tbnh=108&tbnw=136&prev=/images%3Fq%3Dciclos%2Bdel%2Bagua&hl=es&usg=__g

- **INAFED. (2005).** *Enciclopedia de los Municipios de México.* Recuperado el 25 de Enero de 2009, de <http://www.inafed.gob.mx/work/templates/enciclo/mexico/mpios/15121a.htm>
- **INEGI. (2010).** *censo2010.* Recuperado el Mayo de 2011, de <http://www.censo2010.org.mx/>
- **La Fuente Larrauri, C. (2006).** *educasitios.* Recuperado el 2009, de http://educasitios.educ.ar/grupo094/files/esctructura_molecular_del_agua_0.jpg&imgrefurl=http://educasitios.educ.ar/grupo094/%3Fq%3Dnode/48&h=309&w=290&sz=21&tbnid=4ld8-0x1efeqLM:&tbnh=117&tbnw=110&prev=/images%3Fq%3Destructura%2Bagua&hl=es&usg=__mBOYVHHW
- **Lees, R. (1982).** *Análisis de los alimentos. Métodos analíticos y de control de calidad 2a Ed.* España: Acribia.
- **Lehninger, A. (1995).** Capítulo 2: El agua. En A. Lehninger, *Bioquímica. Las bases moleculares de la estructura y funcion celular.* (2a Ed. ed., págs. 41-58). España: Omega S.A.

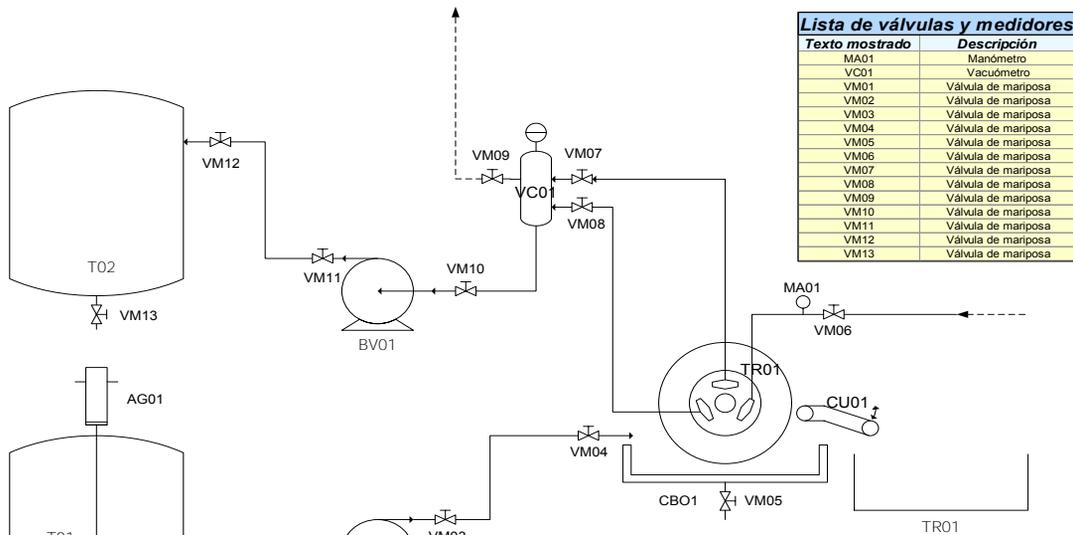
-
-
- **Leyva, V. (1998).** *Aspectos de Ingeniería civil en las plantas de tratamiento residual.* México: Facultad de Ingeniería UNAM.
 - **Manahan, S. (2007).** *Introducción a la química ambiental.* España: Reverté ediciones S.A. de C.V.
 - **Marcano, J. (2007).** *Educación ambiental en la República Dominicana.* Recuperado el 5 de Septiembre de 2009, de <http://www.jmarcano.com/nociones/ciclo1.html>
 - **Mayer, E. (2000).** Cake filtration theory and practice. *Chemical Engineering Journal* , 233-236.
 - **Mc. Cabe, W. (1991).** *Operaciones unitarias en ingeniería Química 4a Ed.* España: Mc. Graw Hill Interamericana de España S.A.U.
 - **Metropolitana, Comisión Ambiental. (2010).** *Agenda de sustentabilidad ambiental para la zona metropolitana.*
Recuperado en Enero del 2011, de http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/asa_zmvm_version_completa.pdf

-
-
- **Mijaylova, P. (2002).** *Tratamiento avanzado de aguas residuales y su reutilización como fuente para uso primario.* Recuperado el 1 de Febrero de 2008, de <http://chac.imta.mx/instituto/historial-proyectos/tc/2002/CA3-Tratamiento.pdf>
 - **Ordoñez, M. L. (Junio de 1996).** Desarrollo teórico sobre los métodos y técnicas de análisis experimental para la operación de filtración. *Tesis de Licenciatura en Ingeniería en Alimentos.* México: Universidad Nacional Autónoma de México.
 - **Oriente, U. d. (24 de Enero de 2000).** *Tratamiento de aguas blancas y aguas residuales.* Recuperado el 15 de Mayo de 2009, de <http://www.sciencepool.com.mx/PDFs/DATOS%20TEORICOS/aguas%20blancas%20y%20residuales.pdf>
 - **Orozco, C. (2003).** *Contaminación ambiental. Una visión desde la química.* España: Thomson.
 - **Perry, R. (1992).** *Manual del Ingeniero Químico. Vol. II 6ta Ed.* México: Mc. Graw Hill de México S.A. de C.V.
 - **PNUMA. (2000).** *Perspectivas del medio ambiente Mundial.* Mundi- Prensa.

-
-
- **Rao, M. (1999).** *Rheology of fluid and semisolid foods. Principles and applications.* U.S.A.: Aspen Publisher Inc.
 - **Rodriguez, E. d. (2003).** Obtención de Sulfato de Aluminio y Sulfato de Sodio a partir de desechos de una planta anodizadora de Aluminio. *Tesis Licenciatura Químico* . México: F.E.S.C. U.N.A.M.
 - **Romero, J. (1999).** *Calidad del Agua. 2a Ed.* México: Alfaomega.
 - **Sans, R. (1999).** *Ingeniería ambiental, contaminación y tratamientos.* Colombia: Alfaomega S.A.
 - **Singh, P. (1998).** *Introducción a la ingeniería de los Alimentos.* España: Acribia S.A.
 - **Spellman, F. (2000).** *Manual de agua potable.* España: Acribia.
 - **Steffe, J. (1993).** *Rheological methods in food process engineering.* U.S.A.: Freeman Press.
 - **Tebbutt, T. (1999).** *Fundamentos de control de calidad del agua.* México: Limusa.

-
-
- **Teoh, S.-K., & Tan, R. (2006).** A new procedure for determining specific filter cake resistance from filtration data. *Chemical Engineering Science* , 4957- 4965.
 - **Toledo, R. (2007).** Physical separation Processes. En R. Toledo, *Fundamentals of food process engineering 3a Ed.* (págs. 475 -500). U.S.A.: Springer Science + Business media.
 - **UIA. (2008).** *UIA*. Recuperado el 20 de Mayo de 2009, de http://www.uia.mx/web/files/la_problematika_del_agua%20.pdf
 - **Unda, F. (2000).** *Ingeniería sanitaria aplicada a saneamiento y salud pública*. México: Limusa.
 - **USGS. (6 de Octubre de 2009).** Recuperado el 26 de Octubre de 2009, de <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>
 - **USGS. (30 de Octubre de 2009).** *USGS*. Recuperado el 2 de Diciembre de 2009, de http://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_hidrol%C3%B3gico
 - **Vostrcil, J., & Tesarik, I. (1972).** A study on the possibility of the water purification by means of precoat filtration. *Water Research Pergamon Press* , 1367 - 1376.

DIAGRAMA DE FLUJO DEL FILTRO DE TAMBOR ROTATORIO DE LA FESC-1 UNAM



Lista de válvulas y medidores

Texto mostrado	Descripción
MA01	Manómetro
VC01	Vacuómetro
VM01	Válvula de mariposa
VM02	Válvula de mariposa
VM03	Válvula de mariposa
VM04	Válvula de mariposa
VM05	Válvula de mariposa
VM06	Válvula de mariposa
VM07	Válvula de mariposa
VM08	Válvula de mariposa
VM09	Válvula de mariposa
VM10	Válvula de mariposa
VM11	Válvula de mariposa
VM12	Válvula de mariposa
VM13	Válvula de mariposa

Lista de equipamiento

Texto mostrado	Descripción
AG01	Agitador de propela
BC01	Bomba centrífuga
BV01	Bomba de vacío
CU01	Cuba de filtración
CU02	Cuchilla
TA01	Tanque de alimentación
TA02	Tanque de recepción