



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO.**



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA.

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO:

**Evaluación de la capacidad de filtración del material
“Fieltro” para partículas de 0.75nm de diámetro en
un filtro prensa.**

PRESENTADA POR:

P.I.Q. José Domingo González Ramírez.

Asesor:

Dr. José Apolinar Cortes.

Morelia, Michoacán, agosto de 2012.

Dedicada a:

Consuelo Ramírez Campos (†), mi Madre, por haberme traído a este Mundo junto con mi Padre J. Antonio González Hueramo, por haberme criado, educado, cuidado y apoyado en todo momento incondicionalmente. Aunque ya no estas conmigo sé que puedes verme y me ayudas continuamente para salir de los problemas y alejarme de ellos, gracias Mami te quiero y te extraño.

Gracias.

Agradecimientos.

- Dios por darme la oportunidad de continuar hasta este momento.
 - Consuelo Ramírez Campos (†).
 - J. Antonio González Hueramo.
 - Lucero Ivvón González Ramírez.
 - A mi numerosa familia, tanto paterna como materna, la cual me brindo su apoyo para concluir distintos procesos de mi vida y simplemente por ser mi familia.
 - A mis amigos, que por el temor de omitir alguno no los nombraré, los cuales estuvieron ahí cuando los necesite y espero también estar ahí cuando ellos me necesiten.
 - Dr. José Apolinar Cortes, que sin su apoyo y guía no hubiera podido concluirse este proyecto.
 - Ing. Luis Germán Castillo Maciel, que sin su apoyo y amistad este proyecto no hubiera sido una realidad.
 - A todos los Profesores de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, los cuales contribuyeron en mi formación académica y moral, brindándome el conocimiento y distintas maneras de actuar y comportarme.
 - A todas las personas que me conocieron y que compartimos momentos en algún momento de mi vida, ya que para bien o para mal contribuyeron a formarme como la persona que soy.
 - A mi perro Tuinki (†) que me hizo muy feliz el tiempo que estuvo conmigo y fue muy fiel e incondicional su cariño conmigo.
-

Índice.

I. Introducción.	1.
Ciclo hidrológico y fuentes de agua.	3.
Agua cruda y sus características.	3.
Agua potable.	4.
Esquemas típicos de tratamiento de agua.	4.
Operaciones físicas unitarias aplicadas en el tratamiento de agua.	8.
Disposición de los subproductos de las plantas de tratamiento de agua.	9.
Descripción del proceso de potabilización de agua.	10.
Descripción general del proceso de potabilización de agua en la planta.	10.
Calidad del agua de la presa de Cointzio.	10.
Proceso de potabilización.	11.
Instalaciones con que cuenta la planta potabilizadora.	14.
Ventajas del filtro.	17.
II. Justificación.	19.
III. Hipótesis.	21.
IV. Objetivo.	22.
Objetivos particulares.	22.
V. Marco teórico.	23.
Filtración.	23.
Teoría básica de la filtración.	24.
VI. Metodología.	29.
Descripción del proyecto.	29.

Descripción del equipo y material utilizado.-----	30.
VII. Realización y desarrollo de las corridas experimentales.-----	33.
Procedimiento para la puesta en marcha y operación del filtro tipo prensa.-----	33.
Análisis realizados.-----	34.
Consideraciones para las corridas experimentales.-----	35.
VIII. Resultados.-----	37.
IX. Cálculos.-----	46.
X. Conclusiones y propuestas.-----	59.
XI. Referencias.-----	60.

I. Introducción.

El agua es esencial para la supervivencia de todas las formas conocidas de vida. Cubre el 78% de la superficie de la corteza terrestre. Se localiza principalmente en los océanos donde se concentra el 96,5% del agua total; los glaciares y casquetes polares poseen el 1,74%; los depósitos subterráneos, los permafrost y los glaciares continentales suponen el 1,72% y el restante 0,04% se reparte en orden decreciente entre lagos, humedad del suelo, atmósfera, embalses y ríos.

Se estima que aproximadamente el 70% del agua dulce es usada para agricultura. El agua en la industria se lleva un promedio del 20% del consumo mundial, empleándose en diversas tareas como transporte y disolvente de una gran variedad de sustancias químicas. El consumo doméstico absorbe el 10% restante.

En todo el mundo el problema número uno y de mayor importancia para todos los países es contar con agua limpia y barata. México, un país rico en recursos naturales, obtiene el agua que consume la población de fuentes tales como ríos, arroyos y acuíferos del subsuelo. Estos acuíferos se recargan de forma natural en época de lluvias. Sin embargo, la época de lluvias tiene una duración promedio de cuatro meses lo que propicia una escasa captación. Aunado a esto, del total de agua captada por lluvias, aproximadamente el 70% se evapora. La desproporción que existe entre la cantidad de agua que se capta por escurrimiento y las extensiones territoriales que comprenden y conjuntamente a la corta temporada de lluvias hace que la disponibilidad del agua sea cada vez menor. Bajo este panorama México enfrenta actualmente graves problemas de disponibilidad, desperdicio y contaminación del agua. Parte de esta problemática, se enfrenta con la construcción de la infraestructura hidráulica que permite abastecer de agua a los diferentes sectores de la población: el agrícola, el industrial, el doméstico y de servicios y para la generación de energía eléctrica, entre otros.

En México el agua se ha tomado como un asunto de seguridad nacional. Los problemas de deforestación, sobreexplotación, alta ineficiencia y falta de tratamiento han ocasionado un déficit muy amplio: las presas más grandes del país se encuentran a 25% de su capacidad. Los organismos de gobierno tienen como objetivo prioritario dotar de más y mejores servicios de agua potable y alcantarillado a una población que con el paso de los años ha aumentado sin control, provocando un incremento en la demanda que resulta difícil de satisfacer. En 2010, nuestro país contaba con una población de 112.337 millones de habitantes en viviendas particulares, de los cuales el 88.7% contaba con servicios de agua potable. Se tiene un promedio nacional de disponibilidad de agua de 4960m³/habitante/año, encontrando ocho veces más agua en el sureste del país que en el resto del país.

Michoacán cuenta con 4.3 millones de habitantes en viviendas particulares, de los cuales 3.7 millones (88.1%) cuenta con servicio de agua potable.

En México se consumen 78000 millones de metros cúbicos de agua al año, 83% se emplea en actividades agrícolas, 12% en los principales centros urbanos y 5% en la industria. Cabe mencionar que el 78% de las aguas residuales domésticas y el 85% de las aguas residuales industriales son descargadas a cuerpos de aguas naturales sin recibir tratamiento alguno.

Los principales factores que no permiten el manejo adecuado del agua en el país son:

- El incremento de la competencia entre estados por el uso del agua.
- Las tarifas cobradas por los organismos operadores no corresponden a los costos reales.
- Sólo 30L de cada 100L se remuneran económicamente al organismo operador.
- Se utilizan 63000 millones de metros cúbicos para agua de riego, aprovechando adecuadamente únicamente el 40%, el porcentaje restante se pierde por diversos factores.
- La industria requiere 190m³/s de agua y genera 6 millones de toneladas de DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno).
- Se extrae más agua de sus fuentes que la que se recupera naturalmente.
- El constante cambio de los directivos de los organismos operadores (cada 2 años en promedio), impide el avance de los proyectos implementados para el eficiente aprovechamiento y tratamiento del agua.
- Los adeudos de los organismos operadores, que ascienden a \$11000 millones por uso del agua nacional y a \$50000 millones por descargas.
- La falta de conciencia que existe entre la población para aprovechar el agua correctamente, se podría considerar ésta como la más grave.

Para la sustentabilidad y preservación del agua con el propósito de asegurar su disponibilidad en cantidad y calidad para las generaciones presentes y futuras, lo que implica detener y revertir su deterioro, se requiere:

- Promover la cultura de la conservación del agua; entendida ésta como los hábitos y costumbres de usar racionalmente el recurso.
- Implantar políticas tendientes a controlar el correcto y eficiente manejo del agua para uso agrícola.
- Impulsar la reutilización del agua residual.
- Dar marco legal y adecuación de las tarifas correspondientes a costos reales del uso del agua, así como su eficiente cobro y administración.
- Cumplimiento a todos niveles de las normas ambientales.

Debemos recordar que el agua dulce es recurso escaso en todo el mundo y debemos cuidarlo.

Ciclo hidrológico y fuentes de agua.

Las aguas naturales forman parte de un ciclo continuo. La humedad que se evapora de los océanos y otras superficies de agua es precipitada a su vez en forma de lluvia, nieve y granizo. Parte de esta precipitación regresa a las superficies de agua y el resto cae sobre la tierra. De esta última, una porción es empleada por la vegetación, una cantidad se evapora, otra parte corre hacia los océanos por conducto de corrientes de agua y lagos y el resto penetra en la tierra. El almacenamiento de agua para suministro se realiza mediante la intercepción de corrientes superficiales de agua o por la captación del agua que se ha infiltrado en la tierra.

Las condiciones hidrológicas relacionadas con la lluvia, con las corrientes de agua y con la infiltración, son factores de elevada importancia en la formación de depósitos de aguas de abastecimiento y en la purificación de éstas. Las variaciones de estos factores afectan, no sólo la cantidad de agua aprovechable, sino también su calidad.

Las fuentes de agua del ciclo hidrológico pueden clasificarse de la siguiente manera:

1. Lluvia y nieve.
2. Agua de Superficie.
 - a. Corrientes de aguas.
 - b. Lagunas y lagos naturales.
 - c. Embalses.
3. Aguas subterráneas.
 - a. Manantiales.
 - b. Pozos poco profundos y galerías de infiltración.
 - c. Pozos profundos.

Agua cruda y sus características.

Las características del agua cruda varían mucho, las mayores diferencias se encuentran entre el agua superficial y la subterránea, entre el agua dura y la blanda, y entre el agua de río comparada con el agua de depósitos. Estas diferencias presentan necesidades variables en cuanto al control de algas, a la remoción de la turbiedad, al ablandamiento, a la estabilización y a la desinfección del agua. Las aguas muy contaminadas tienen requerimientos adicionales respecto a la remoción de productos orgánicos e inorgánicos.

En general, los abastecimientos de agua dentro de una región geológica definida son semejantes. Ha habido una tendencia hacia el agua superficial debido a su disponibilidad y para reducir los riesgos de hundimiento de terreno debido a la extracción no controlada del agua subterránea.

Un agua cruda con baja turbiedad constante tiene más posibilidades de tratamiento que una de alta turbiedad o de turbiedad variable. La presencia de color en muchas de las aguas de baja alcalinidad requiere de consideraciones para un tratamiento especial. El control de la corrosión se volverá más importante según se monitoree la calidad del agua para cumplir con las normas.

Agua potable.

Las comunidades difieren mucho en carácter y tamaño, pero todas tienen las mismas preocupaciones comunes por hallar, tratar y distribuir el agua para usos industriales, comerciales y domésticos. Los usos domésticos incluyen el lavado, el transporte de desechos, el agua para beber, la preparación de alimentos, el riego de los jardines, así como la protección de incendios, entre otros. El uso doméstico en la ciudad de Morelia es de alrededor de $0.32\text{m}^3/\text{día}/\text{habitante}$, de los cuales, menos del 1% se consume.

El agua potable debe ser pura, de buen sabor y tener las siguientes características: encontrarse libre de organismos patógenos, de sustancias tóxicas o fisiológicamente indeseables; por otra parte debe ser agradable al gusto, a la vista, al olfato y al tacto, para que esto se cumpla el agua debe estar exenta de color, turbidez, sabor, olor, poseer una temperatura moderada y estar bien aireada.

Para que el agua sea aceptable y útil en términos generales, llegando a adquirir máxima importancia, el que sea microbiológicamente segura para su consumo doméstico e industrial. En el agua existen cinco clases de organismos capaces de infectar al ser humano, los cuales son las bacterias, protozoarios, helmintos, virus y hongos. Algunos de estos completan su ciclo de vida al pasar a través de un portador acuático intermedio. Otros son simplemente transportados por el agua.

El agua se ha tratado durante miles de años por varios procesos. Se descubrió que el cloro es efectivo como desinfectante al destruir los organismos patógenos (causantes de enfermedades). Manteniendo residuos de cloro en el sistema de distribución se produce un agua segura y se protege contra la contaminación. En muchos países se usa actualmente la cloración y en otros se usa el ozono como agente desinfectante. El método utilizado en Morelia es el de la cloración del agua.

Esquemas típicos de tratamiento de agua.

El tipo de tratamiento que se utilice en un organismo potabilizador cualquiera, depende mucho de las características del agua cruda. Siempre que sea posible, se adquiere y se mantiene en buen estado el equipo para reducir los costos de capital de la planta.

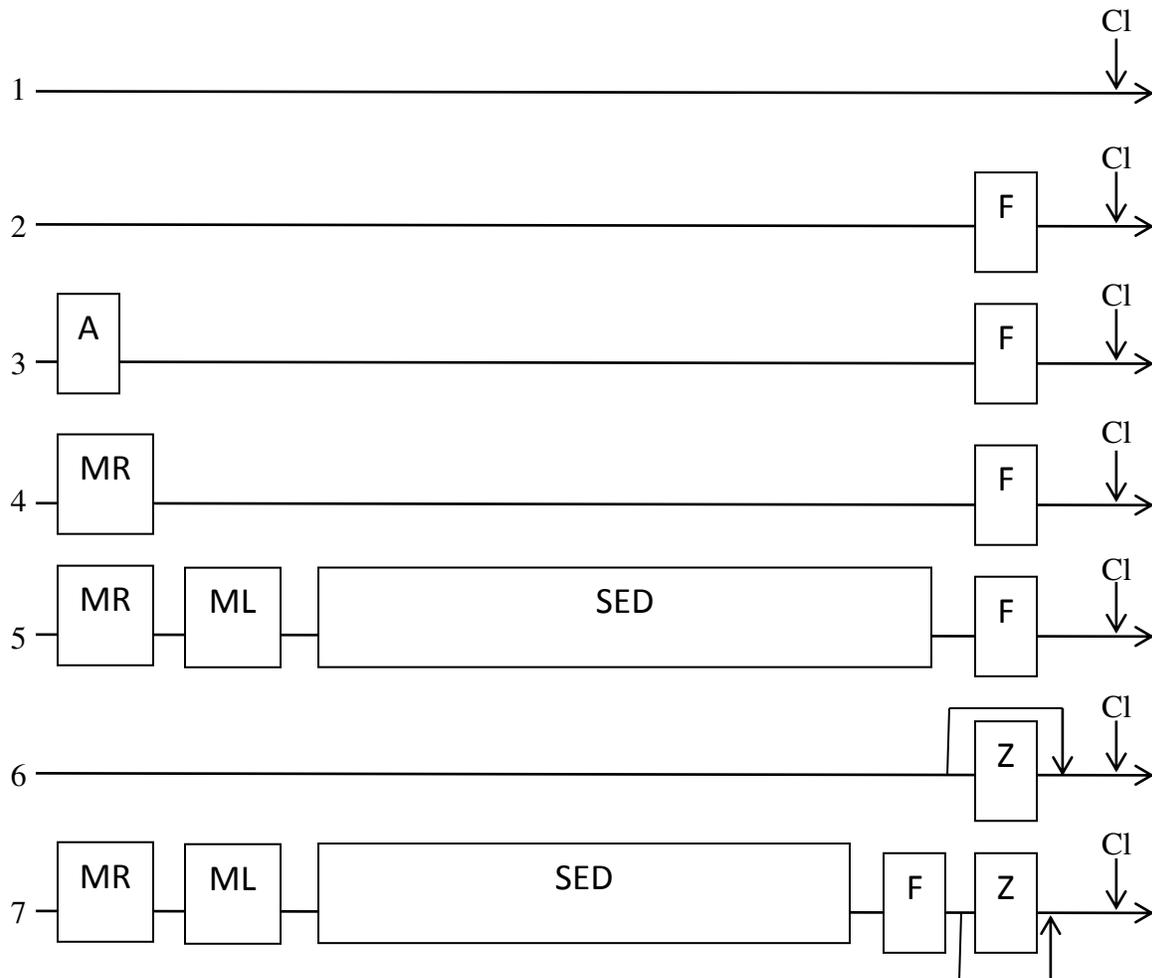
En la Tabla 1-1 se muestran las impurezas comúnmente encontradas en los abastecimientos de agua cruda, así como los tipos generales de tratamiento que pueden emplearse. La elección del tratamiento óptimo depende de las condiciones locales y del nivel de impurezas del agua.

En la Figura 1-1 se muestra un resumen de los procesos usados para el tratamiento del agua municipal. En la mayoría de los organismos potabilizadores se usa simplemente el esquema mostrado por la trayectoria de flujo 1, tomando el agua de un pozo, esterilizándola por cloración y bombeándola directamente al sistema de distribución. La mayor parte de los sistemas como éste, son pequeños y operan con frecuencia solo con supervisión parcial. Cada organismo potabilizador es responsable por la revisión de la calidad del agua, tanto química como bacteriológicamente. En algunos casos con este esquema puede aplicarse algún producto químico para la estabilización final, haciendo así mínimas la incrustación o la corrosión.

Tabla 1-1. Impurezas típicas del agua y métodos comunes de tratamiento.

Tratamiento	Turbiedad	Sabor y olor	Dureza	Color	Corrosión
Pre aireación		X			
Filtración con o sin productos químicos	X			X	
Intercambio iónico			X		
Ablandamiento por precipitación de una o dos etapas	X	X	X	X	
Clarificación química y filtración	X	X	X	X	
Oxidación		X		X	
Cloración		X		X	
Adsorción		X		X	
Fosfatos					X
Fosfatos de zinc					X

Figura 1-1. Esquema simplificado de los diagramas de flujo de tratamiento de aguas municipales.



Cl: Cloración. F: Filtración. A: Aireación. MR: Mezcla rápida. ML: Mezcla lenta. SED: Sedimentación. Z: Ablandamiento (zeolita).

La trayectoria de flujo 2, muestra sólo la adición de un sistema de filtración. Debido a las limitaciones que presenta el filtro de arena en cuanto a su capacidad para la retención de sólidos suspendidos, este sistema se aplica por lo general sólo a aguas embalsadas de excelente calidad donde la post-cloración pueda conseguir un agua potable segura.

El filtro puede instalarse también para clarificar aguas de pozos poco profundos en las que el hierro suspendido puede constituir un problema ocasional. Sin embargo, hay riesgos en este tipo de sistema, porque el filtro sólo elimina los sólidos suspendidos, los cuales raramente son el único problema en el abastecimiento de agua cruda. En la trayectoria de flujo 3, se muestra la adición de un aireador antes del filtro para eliminar los sabores, olores y eliminar el hierro. Usualmente, después se añade cal para elevar el pH hasta valores entre 8.0-8.5 y luego floculante, ya que el precipitado de hierro suele ser coloidal.

En la práctica moderna, habitualmente, se considera que el mínimo equipo es el que se muestra en la trayectoria de flujo 4 y por lo general, se limita a aguas embalsadas en las que haya bajas concentraciones uniformes de sólidos suspendidos que dependen de la presencia estacional de algas y en las que la desinfección final pueda garantizar un agua tratada segura para la población. En el manejo de aguas superficiales que contengan sólidos suspendidos en cantidad apreciable, tal es el caso del agua de la presa de Cointzio, los dispositivos de mezclado rápido de la trayectoria de flujo 4 son seguidos por un floculador de mezclado lento y por un estanque de sedimentación en la trayectoria de flujo 5, proporcionando la retención para el asentamiento de la mayor parte de los sólidos floculados para que la carga en el filtro se reduzca en forma mensurable. La retención puede servir también para la desinfección de agua cruda con la adición de cloro conjuntamente con los coagulantes químicos, o después de éstos para disminuir la demanda final de cloro. El paso de pre cloración puede también mejorar la floculación al destruir algunos contaminantes orgánicos, además evita que los sólidos sedimentables se vuelvan sépticos y suban a la superficie cuando se forman gases.

En algunos casos en los que el agua ya es clara, el problema principal puede ser causado por el calcio y el magnesio. En la trayectoria de flujo 6, este tipo de agua se ablanda por medio de la zeolita. Parte del agua se desvía de modo que el efluente pueda tener una dureza controlada. La trayectoria de flujo 7 incluye no sólo la clarificación del agua superficial, sino también el ablandamiento final al pasar una porción del efluente a través de una unidad de zeolita. En este esquema, en el tanque de sedimentación puede efectuarse un ablandamiento con cal al mismo tiempo que la clarificación para reducir la carga en la unidad de zeolita.

Operaciones físicas unitarias aplicadas en el tratamiento de agua.

Las operaciones llevadas a cabo en el tratamiento de las aguas, en las que los cambios en las propiedades del agua se realizan mediante la aplicación de las fuerzas físicas, se conocen como operaciones físicas unitarias. Dado que el origen de estas operaciones se encuentra en la observación directa de fenómenos que se daban en la naturaleza, constituyen los primeros métodos de tratamiento empleados por el hombre. Hoy en día, las operaciones físicas unitarias constituyen la base de la mayoría de los diagramas de flujo de procesos. En la Figura 1-2 se muestran las operaciones físicas unitarias que suelen utilizarse en un diagrama de flujo de procesos típico correspondiente al tratamiento del agua residual.

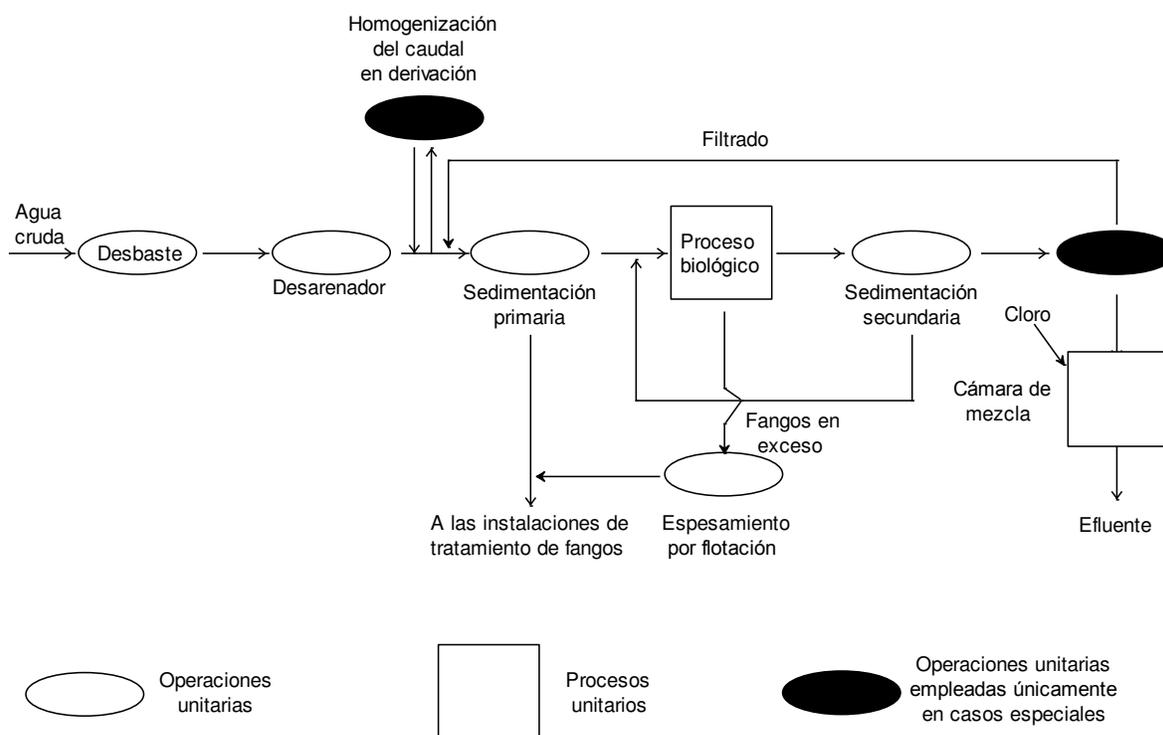


Figura 1-2. Operaciones físicas unitarias en el diagrama de flujo de una planta de tratamiento de agua.

Las operaciones físicas unitarias más empleadas incluyen: medición de caudales, desbaste, dilaceración, homogenización de caudales, mezclado, sedimentación, sedimentación acelerada, flotación, filtración, transferencia de gases y volatilización y arrastre de gases. En la Tabla 1-2 se resumen las principales aplicaciones de cada una de ellas.

Tabla 1-2. Aplicaciones de las operaciones unitarias en el tratamiento de agua.

Operación unitaria	Aplicación
Medición de caudal	Control y seguimiento de procesos, informes de descarga.
Desbaste	Eliminación de sólidos gruesos y sedimentables por intercepción (retención en superficie).
Dilaceración	Trituración de sólidos gruesos hasta conseguir un tamaño más o menos uniforme.
Homogenización del caudal	Homogenización del caudal y de las cargas de DBO y de sólidos en suspensión.
Mezclado	Mezclado de productos químicos y gases con el agua residual, mantenimiento de los sólidos en suspensión.
Floculación	Provoca la agregación de pequeñas partículas aumentando el tamaño de las mismas, para mejorar su eliminación por sedimentación.
Sedimentación	Eliminación de sólidos sedimentables y espesado de fangos.
Flotación	Eliminación de sólidos en suspensión finamente divididos y de partículas con densidades cercanas a la del agua. También espesa los fangos biológicos.
Filtración	Eliminación de sólidos en suspensión residuales presentes después del tratamiento químico o biológico.
Micro tamizado	Mismas funciones que la filtración. Elimina las algas de los efluentes de las lagunas de estabilización.
Transferencia de gases	Adición y eliminación de gases.
Volatilización y arrastre de gases	Emisión de compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles del agua residual.

Disposición de los subproductos de las plantas de tratamiento de agua.

En el proceso de tratamiento del agua, los subproductos sólidos que se producen por la eliminación de contaminantes del agua cruda se convierten en un problema de disposición secundaria. Para hacer mínimos los costos de manejo de los lodos, el volumen de lodos producidos debe reducirse hasta donde sea práctico.

Una vez que la química del tratamiento del agua se ha investigado para determinar el proceso óptimo que produzca la menor cantidad de subproducto, debe enfocarse en el tipo de proceso de disposición necesario para manejar los sólidos. Cuando es posible, el uso potencial del subproducto por alguna industria local debe ser considerado. Pueden incluirse actividades tan diferentes como la manufactura de ladrillos, la producción de tablas para pared y la agricultura.

El contenido de álcali de los lodos de cal puede ser valioso en la neutralización de desechos ácidos, tales como el licor de limpiado en una acería. Encontrar usos prácticos para los lodos no sólo reduce los costos de su manejo, sino que también elimina la necesidad de confinar el material sólido.

Descripción del proceso de potabilización de agua.

El proceso de potabilización de agua en la planta potabilizadora de Morelia, Michoacán, se lleva a cabo con las siguientes etapas principalmente:

1. Cribado.
2. Coagulación.
3. Floculación.
4. Sedimentación.
5. Desinfección.
6. Filtración.
7. Almacenamiento y distribución.

Descripción general del proceso de potabilización de agua en la planta.

El agua cruda llega a la presa de Cointzio a través de un canal de concreto, el cual tiene una extensión de 13.76km.

Se tiene instalada una válvula de compuerta tipo Miller de 16'' de diámetro, para regular el gasto que en promedio es de 600L/s a 700L/s, el excedente es descargado al drenaje municipal. Se tiene un registro en el cual está colocada una parrilla de acero al carbón o criba de 2cm; con el objeto de retener los sólidos de mayor tamaño, adelante del registro se encuentra la caja de transición, en donde el canal se interconecta a una tubería de hierro colado de 24'' de diámetro y en la cual el fluido sufre un cambio de dirección de 90°. A partir de esta tubería general de 24'', se tienen las respectivas derivaciones que alimentan a cada uno de los cuatro tanques clarifloculadores o sedimentadores de aguas claras y posteriormente hacia los filtros, el agua pasa a los tanques de almacenamiento y de ahí se distribuye a la ciudad.

Calidad del agua de la presa de Cointzio.

Se estimó el tratamiento necesario del agua de acuerdo con las características obtenidas de la misma almacenada en la presa de Cointzio. Se tienen reportes con los siguientes valores:

Turbiedad: 100-2500 unidades Jackson.

Color: 3500-600 unidades en la escala Pt-Co.

pH: 7.2-7.8.

Dureza: 33-76 mg/L.

El agua de la presa de Cointzio tiene características que ninguna otra presa del país posee, esto se debe al tipo de sólido que contiene esta agua, que es una arcilla ferruginosa en estado coloidal.

Proceso de potabilización.

El agua de la presa de Cointzio se ha venido tratando constantemente con las siguientes sustancias químicas:

1. Sulfato de aluminio líquido.
2. Sílice activada.
3. Cal química.
4. Cloro gas.
5. Polímero catiónico.

El sulfato de aluminio, comúnmente llamado alumbre, es el coagulante primario y es el producto utilizado para la desestabilización de las partículas suspendidas en el agua o coloides, que se consigue especialmente por medio de la neutralización de sus cargas eléctricas generalmente negativas, formando un precipitado.

Se utiliza sulfato de aluminio líquido, el cual es agregado conjuntamente con un polímero catiónico que disminuye la cantidad necesaria del sulfato de aluminio, para llevar a cabo la coagulación; esto se debe a que se agrega demasiado sulfato de aluminio, el agua clara que va a dar a la ciudad se encontrará con residuos de aluminio. Se agregan en promedio 54ppm de sulfato de aluminio y 1.2ppm de polímero catiónico.

El sulfato de aluminio en solución se agrega directamente a la corriente de agua cruda proveniente de la presa y va a dar a las cajas de mezcla rápida o coaguladores en cada tanque sedimentador aprovechando la turbulencia del canal y su velocidad para la mezcla. Teniendo en cuenta que la neutralización de los coloides es el principal objetivo que se pretende en el momento de la introducción del coagulante, es conveniente que el reactivo utilizado (sulfato de aluminio) se difunda con la mayor rapidez posible.

El tiempo de coagulación es extraordinariamente breve (menor a 1 segundo) y la utilización óptima del coagulante exige que la neutralización de los coloides sea total antes de que una parte del coagulante haya comenzado a precipitar.

La turbulencia que se tiene en la caja de mezcla de los tanques es suficiente para asegurar una buena dispersión del coagulante en el agua.

El coagulante introducido da lugar a la formación del floculo, pero es necesario aumentar su volumen, su peso y sobre todo su cohesión. Para esto se usan ciertos productos llamados floculantes, llamadas también ayudantes de coagulación; son productos destinados a favorecer cada una de estas operaciones. La acción se ejerce al nivel de la velocidad de reacción (floculación más rápida) o a nivel de las características del floculo (más pesado, más voluminoso y más coherente).

La sílice activada fue el primer floculante que se empleó y sigue siendo, en la actualidad, el que mejores resultados puede dar, principalmente si se utiliza conjuntamente con sulfato de aluminio. En la planta se introduce la sílice activada antes coagulante, en un punto común, a la entrada del agua a la planta, le da al floculo más peso y cohesión y ayuda a eliminar color. Se prepara neutralizando parcialmente una solución de silicato de sodio al 1%; la neutralización se lleva a cabo entre 85% y 90% con ácido sulfúrico. Se tienen en la planta dos pilas de concreto instaladas de 20m³ de capacidad cada una para la preparación de la sílice activada, ésta se agrega a razón de 1.5ppm.

Se vierten en la pila, aproximadamente, 695kg de silicato, se empieza a llenar la pila con agua y se ponen a trabajar los agitadores; cuando la solución cubre las aspas de los agitadores se empieza a vaciar el ácido sulfúrico, aproximadamente 85kg, hecho esto se analiza la alcalinidad resultante, se agita por dos horas y entonces puede usarse.

Después de 8 días comienza a degradarse la solución, por lo cual se recomienda usarse antes de este tiempo. Debe cuidarse la neutralización, pues si se realiza en forma total, la solución se gela (se forma un gel) y debe deshacerse. Este procedimiento se conoce como método de Baylis.

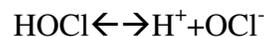
El agua, después de pasar por la caja de mezcla rápida, llega a la cámara de floculación, en donde recibe una agitación mecánica lenta para favorecer el crecimiento del floculo. De esta parte, el agua pasa al sedimentador de flujo semivertical como una corriente descendente, imprimiéndole al floculo la dirección adecuada con el objeto de que se deposite en el fondo. El agua clarificada asciende y es recogida a través de una serie de canaletas rectangulares instaladas en la superficie del tanque.

Los lodos sedimentables en el tanque son purgados cada 8 horas (45min por purga) de manera hidráulica a través de una serie de válvulas operadas manualmente que se encuentran instaladas en el fondo de estos tanques. **Actualmente estos lodos no reciben tratamiento alguno y son enviados al drenaje municipal que va a dar al río Chiquito.**

El agua clarificada que produce cada uno de los tanques los tanques es vertida en un canal general afluente hacia los filtros. Antes de llegar a los filtros entra a un tanque en donde se decanta el excedente (si hay) al drenaje municipal.

Debido a que el sulfato de aluminio reacciona con la alcalinidad del agua, se tiene un descenso en el pH (pH=6), por lo cual es necesario agregar cal química para ajustar el pH y llevarlo al punto neutro (pH=7). Es precisamente antes de entrar a los filtros donde se agrega la cal química y es en este punto donde se aplica el desinfectante, se aplica cloro oxidante de materia orgánica. Se agregan 2ppm de cloro en solución.

La reacción del cloro con el agua es:



La propiedad oxidante del cloro es retenida en el ácido hipocloroso formado y es también en esta forma como se realiza la acción principal desinfectante de las soluciones de cloro. La reacción de disociación del ácido hipocloroso está en función principalmente del pH y la temperatura.

El cloro va a existir en el agua como ácido hipocloroso y como iones hipoclorito y se define como cloro libre disponible 1ppm. Este canal se conecta a los filtros a través de una tubería de 24'', el agua se distribuye en los filtros a través de una serie de líneas instaladas en cada uno de ellos. Los filtros se denominan como filtros rápidos de arena (antracita)

La filtración tiene la función de separar a los sólidos suspendidos, microflóculos e incluso coloides presentes en el agua al pasarlos por un medio poroso y que no fueron eliminados en el proceso de sedimentación por diversos factores. Los filtros reciben el agua por la parte superior del lecho filtrante, con lo cual se tiene un flujo descendente a través del material poroso, debido a esto las partículas son retenidas en el lecho filtrante.

La retención paulatina de las partículas en el lecho se debe a que van ocupando los espacios libres al pasar el agua con los sólidos. Cuando ocurre este fenómeno se hace necesario lavar el filtro (retrolavarlo), para esto se utiliza un tanque con capacidad de 400m^3 , ubicado en la parte alta de la planta, se invierte la dirección del flujo de agua en el filtro, con esto se retiran las impurezas del lecho y se vierten en unas canaletas instaladas en cada filtro, donde posteriormente son enviadas al drenaje. Se usan en promedio 180m^3 de agua limpia en cada operación de lavado. Las aguas claras filtradas que salen de cada unidad recorren la galería hasta llegar a los tanques de regularización, de donde por gravedad se distribuyen a la ciudad.

Se cuenta con un pequeño cárcamo en donde se aplica energía de bombeo para lograr hacer llegar el agua potable a la parte alta de la ciudad.

Instalaciones con que cuenta la planta potabilizadora.

Consta de un edificio principal, en el cual se ubica el laboratorio químico, la sala de dosificación de cal y algunas oficinas. En segundo nivel de este edificio se encuentra el almacén de la cal química y es ahí donde se vierte este reactivo a las tolvas de dosificación.

Cuenta con cuatro tanques sedimentadores de flujo semivertical de diseños y capacidades diferentes. Estos datos se pueden consultar en la Tabla 1-3.

Tabla 1-3. Dimensiones de los tanques.

Tanque sur	Mezclador	Floculador	Sedimentador
Largo (m)	1.96	12.16	33.42
Ancho (m)	4.24	9.38	10.24
Profundidad (m)	2.15	4.60	4.70
Volumen (m³)	17.88	524	1608.44
Tanque centro	Mezclador	Floculador	Sedimentador
Largo (m)	1.96	12.16	33.42
Ancho (m)	4.24	9.38	10.24
Profundidad (m)	2.15	4.60	4.70
Volumen (m³)	17.88	524	1608.44
Tanque norte	Mezclador	Floculador	Sedimentador
Largo (m)	2.10	6.60	33.42
Ancho (m)	4.50	16.25	16.25
Profundidad (m)	2.15	4.70	4.80
Volumen (m³)	16.25	504.08	2606.76
Tanque nuevo	Mezclador	Floculador	Sedimentador
Largo (m)	1.50	9.30	31.88
Ancho (m)	5.24	12.75	12.75
Profundidad (m)	2.35	5.97	5.97
Volumen (m³)	18.47	707.89	2426.63

Con estos datos y conociendo el gasto de agua que llega a cada uno de estos tanques, podemos calcular matemáticamente el tiempo de retención. El tiempo de retención es el periodo de tiempo que teóricamente debe transcurrir para que el agua pase a través de un tanque o depósito suponiendo que toda el agua se mueva a una velocidad uniforme; matemáticamente es igual al volumen del tanque dividido entre el gasto.

Tabla 1-4. Tiempo de retención.

Tanque	Volumen (m³)	Gasto (m³/s)	Tiempo de retención
Sur	2151	0.130	4:36:00
Centro	2151	0.130	4:36:00
Norte	3127	0.240	3:37:00
Nuevo	3153	0.110	7:58:00

Cuenta con dos tanques de almacenamiento grandes, uno pequeño para abastecer una colonia aledaña y uno más para dar servicio a la planta y lavar los filtros. En la Tabla 5-3 se describen sus dimensiones.

Los tanques sedimentadores son de base plana horizontal, por lo que aun cuando son purgados, queda un lecho en el fondo de lodos el cual se va acumulando. Por lo tanto se requiere para el proceso de potabilización vaciar los tanques clarifloculadores y lavarlos manualmente con mangueras y cepillos, eliminando así el lodo del fondo. La frecuencia con la que se lavan los tanques es cada 2 meses en tiempo de lluvias y 4 meses en tiempo de estiaje, durando aproximadamente 3 horas en este proceso.

Tabla 1-5. Dimensiones de los tanques de almacenamiento.

Parámetro	Tanque 1	Tanque 2	Tanque 3	Tanque 4
Largo (m)	56.80	36.10	6.60	12.00
Ancho (m)	40.20	36.10	6.50	12.00
Altura (m)	2.85	2.77	2.10	3.20
Volumen (m³)	6507	3610	90	460

El tanque 1 recibe agua desinfectada de la Mintzita y la distribuye a la ciudad. Los tanques de almacenamiento 2 y 3 reciben agua tratada de la planta y la distribuyen a la ciudad. El tanque 4 es el de servicio de la planta, y de donde se toma el agua para retrolavar los filtros.

Se tienen dos dosificadores para el manejo de la cal química, marca Omega, con capacidad de 100kg/h.

Se tienen dos cloradores marca de capacidad de 225kg/día, montados en gabinete con rotámetros de 180kg/día y 45kg/día. El cloro líquido se maneja en contenedores de 907kg.

Se tienen dos pilas de concreto de 20 m³ de capacidad con sus respectivos agitadores y es aquí donde se prepara la solución de sílice activada.

Se cuenta con una planta eléctrica de emergencia para el servicio de la planta.

También se cuenta con 10 filtros en la planta, de los cuales 5 están siempre en operación y los demás se retrolavan y se dejan listos para su funcionamiento cuando se requiera. Son denominados filtros rápidos de arena con fondo tipo Wheeler de hormigón prefabricado y patentado. El fondo Wheeler no es más que una pirámide truncada invertida con un arreglo de esferas de porcelana; se tienen cinco esferas de 3'' de diámetro dentro del fondo de la depresión, una colocada en el centro y las otras cuatro en cada vértice de la pirámide; en seguida se tienen ocho esferas de 1¼'' de diámetro, colocadas encima entre los espacios de las cuatro esferas grandes y los lados o caras de la depresión. Finalmente, se tiene una esfera de 1⅜'' en el centro entre las cuatro esferas grandes.

Las esferas de porcelana sustentan una capa de gravilla clasificada en cuatro tamices diferentes como a continuación se describe en la Tabla 1-6.

Tabla 1-6. Especificaciones de los filtros.

Espesor de la capa (In)	Tamaño de la gravilla
3	5/8''-1''
3	3/8''-5/8''
3	3/16''-3/8''
3	#10-3/16''

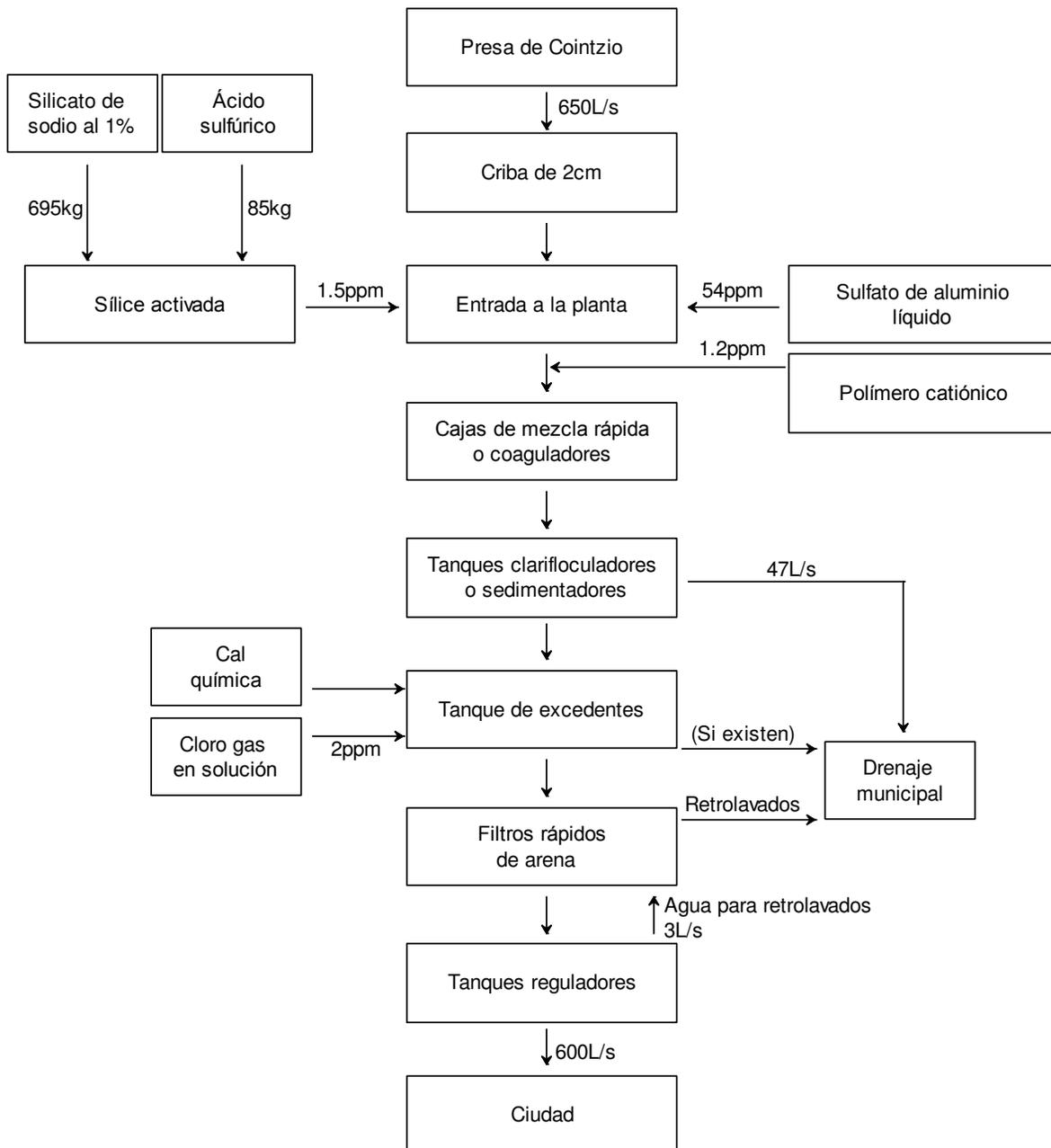
Encima de estas gravillas va una capa de 27'' de arena de 0.05mm que puede llevar antracita. Los filtros tienen un área de 36m².

Finalmente el agua que se distribuye del tanque regulador a la ciudad debe ir con un pH de 6.5-7.5, normalmente es de 7.3, según las normas fijadas y con un cloro residual de 1ppm, esto para mantener el agua libre de bacterias hasta su destino. La planta potabilizadora de la ciudad de Morelia abastece al 75% de la población, la parte restante se abastece de pozos profundos ubicados en diferentes zonas de la ciudad.

Ventajas del filtro.

- Hay una excelente distribución del agua de lavado en toda el área del filtro, esto gracias al efecto de tobera que producen las esferas de porcelana.
- No existe contacto alguno de metales con el agua, por lo cual no existen problemas de corrosión.
- Buena eficiencia del filtro.
- El arreglo de las esferas no permite el arrastre de la gravilla.

Figura 1-3. Diagrama de flujo del proceso de potabilización en la planta de Morelia.



II. Justificación.

El agua potable es necesaria para mantener el bienestar poblacional, así como, para mejorar la calidad de vida; por estas razones debe mejorarse la calidad del agua potable e incrementar la cobertura de este servicio en cualquier centro urbano. Lo anterior se logra con acciones institucionales y particulares.

En el caso de nuestra ciudad de Morelia el 75% del agua potable abastecida a la población proviene de la presa de Cointzio. La planta potabilizadora de agua, descarga cada 8 horas una corriente de purga de agua residual de 75L/s en promedio, que contiene principalmente agua con arcilla suspendida y agentes coagulantes. Debido a las características de esta corriente, se generan efectos adversos en la capacidad de tratamiento y auto purificación del cuerpo receptor, que en este caso es el río Chiquito de esta misma ciudad, por la modificación de sus condiciones y/o características naturales. Esta corriente de agua tiene un pH de 6 y un gran contenido de sólidos. La disminución del pH, provoca que los microorganismos (bacterias) disminuyan su capacidad metabólica y como consecuencia la capacidad de biodegradación, ya que inhibe la actividad enzimática (romper materia orgánica grande en componentes más pequeños). Aunque algunas bacterias puedan vivir en condiciones ácidas, la mayor parte de los organismos se desarrollan preferentemente en un rango de pH de 6.5 a 8 aproximadamente.

Los sólidos suspendidos además de generar el azolvamiento del río y restar su capacidad de captación, también provocan la disminución de la solubilidad del oxígeno en el agua y la obstrucción de la luz solar; como la cantidad de oxígeno producido por las algas se ve directamente afectada por la cantidad de luz solar y existe una relación simbiótica entre las algas productoras de oxígeno y las bacterias consumidoras del mismo (aeróbicas), esta disminución del oxígeno disuelto tiene efectos desfavorables sobre el metabolismo de las bacterias. Por lo anterior se reduce la capacidad benéfica que tiene las bacterias en la purificación natural de las aguas de desecho que se vierten en el río Chiquito de Morelia.

Por otra parte, la cantidad de agua que se desecha en las corrientes de purga a lo largo del día, es del orden de 4000m³ (aproximadamente), teniendo en cuenta que la población en la ciudad de Morelia está creciendo, se incrementa la dificultad de abastecer de agua potable a todos sus habitantes. Inversamente a este crecimiento demográfico, la presa de Cointzio (capacidad de 60.7Mm³), principal fuente de agua de la ciudad, disminuye con el tiempo en volumen y calidad. Tomando en cuenta este problema, es de vital importancia encontrar alternativas de tratamiento de agua residual, así como evitar su desperdicio.

En este proyecto se pretende, por medio de las técnicas aprendidas en la institución educativa y el uso del método científico, obtener resultados positivos para el tratamiento y reutilización del agua de purga desechada de los distintos sedimentadores de la planta potabilizadora de agua de Cointzio para su posible instalación dentro de la misma, así como contribuir con la minimización de agua residual. El proceso que se utilizará para llevar a cabo este proyecto será el de filtración en un filtro tipo prensa; los productos a obtener del proceso de filtración, torta y filtrados se consideran valiosos. La torta (material sólido), es un material arcilloso con altos contenidos de $\text{Al}(\text{OH})_3$, que lo hace útil para la producción de materiales de ornato y construcción. Por su parte los filtrados, serán reciclados para incorporarse nuevamente en el proceso y poder ser aprovechados para tratarlos y posteriormente enviarlos por la red de distribución de agua potable, lo que permitirá la recuperación del 4% de agua utilizada en el proceso.

III. Hipótesis.

Se hará uso de un equipo de filtración tipo prensa y un medio filtrante conocido industrialmente como *Fieltro*, que debido a sus características resulto el más adecuado para el tamaño de partículas de 0.75nm (en promedio). Se espera que el medio filtrante pueda retener prácticamente todas las partículas sólidas suspendidas para obtener un filtrado libre de una muy alta calidad, para poder aplicar este medio filtrante en procesos con partículas de similar tamaño sin que se tenga una caída de presión que impida su utilización por costo en energía.

IV. Objetivo.

La evaluación de este sistema de filtración tiene el objetivo de separar material arcilloso en suspensión proveniente del sistema de tratamiento para agua potable; sin embargo, dadas las limitaciones técnicas y de transporte de esta suspensión, se propone realizar el estudio con una suspensión preparada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (cal), ya que en referencia al tamaño de partícula ambos poseen prácticamente las mismas características.

Recuperar los sólidos suspendidos en un filtro prensa para obtener un filtrado de alta pureza. Utilizando Fieltro como medio filtrante, determinando la eficiencia de separación.

Objetivos particulares.

- I. Obtener un filtrado con la menor cantidad de sólidos suspendidos.
- II. Determinar la eficiencia del medio filtrante para partículas de 0.75nm.
- III. Determinar la resistencia del medio filtrante.
- IV. Determinar la resistencia de la torta formada, así como la humedad que presenta.
- V. Determinar el tiempo de operación del equipo.
- VI. Fijar el flujo idóneo para la mejor separación.
- VII. Determinar el efecto de la concentración de la suspensión de entrada en el filtrado obtenido.

V. Marco teórico.

Filtración.

Es la separación mecánico o física de un sólido suspendido en un fluido (líquido o gas) mediante un material poroso que retiene las partículas hasta un cierto tamaño y permite el paso del filtrado libre de estos sólidos. En la filtración se establece una diferencia de presión que hace que el fluido fluya a través de poros pequeños que impiden el paso, de las partículas sólidas las que a su vez, se acumulan sobre la tela como torta porosa. El equipo industrial de filtración difiere del de laboratorio únicamente en lo que respecta a la cantidad de materia que se maneja y en la necesidad de operar a costos bajos.

Uno de los tipos de filtros más importantes es el filtro prensa de placas y marcos, que se muestra en la Figura 5-1. Estos filtros consisten de placas y marcos alternados con una tela filtrante a cada lado de las placas, Las placas tienen incisiones con forma de canales para drenar el filtrado en cada placa. La suspensión de alimentación se bombea en la prensa y fluye a través del conducto al interior de cada uno de los marcos abiertos, de manera que va llenando los espacios vacíos. El filtrado fluye entre la tela filtrante y la superficie de la placa, a través de los canales y hacia el exterior, mientras los sólidos se acumulan como torta en los marcos. La filtración continúa hasta que los marcos quedan completamente llenos de sólidos. En muchos casos, el filtro prensa tiene una descarga abierta individual para cada marco, que permite una inspección visual para verificar la transparencia del líquido filtrado. Si una de las salidas descarga líquido turbio debido a una perforación de la tela o a otras causas, se puede cerrar por separado y continuar con la operación. Cuando los espacios están totalmente llenos, las placas y los marcos se separan y se extraen las tortas. Después se vuelve a armar el filtro y se repite el ciclo.

Las prensas de placas y marcos presentan los inconvenientes comunes a todos los procesos por lotes. El costo de mano de obra para extraer las tortas y volver a ensamblar la unidad, más los costos fijos por tiempos muertos, pueden constituir una porción muy elevada de los costos totales de operación. Algunos modelos modernos de prensas de placas y marcos tienen un juego duplicado de marcos montados en un eje giratorio. Mientras se usa la mitad de los marcos, la otra mitad se descarga y se limpia, lo que reduce los costos de mano de obra. Existen también sistemas automatizados que se han aplicado a estos tipos de filtros.

Los filtros prensa se usan en los procesos por lotes pero no se pueden emplear para procesos de alto rendimiento. Se manejan con facilidad, son versátiles y de operación flexible y se pueden utilizar a altas presiones si es necesario, con soluciones viscosas o cuando la torta de filtro tiene una gran resistencia.

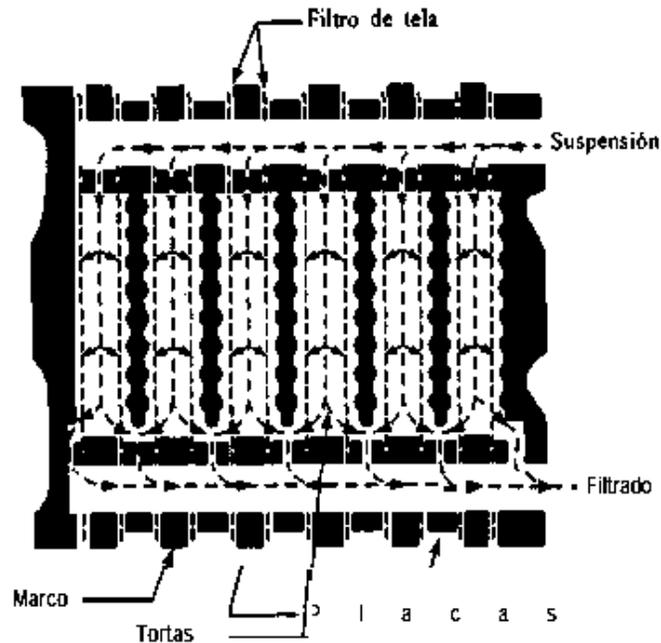


Figura 5-1. Esquema de filtro prensa de marcos y placas.

Teoría básica de la filtración.

Para evaluarla caída de presión del fluido a través de la torta debemos considerar la Figura 5-2 que muestra el corte transversal de una torta de filtración y un medio filtrante en un tiempo definido t (s) desde el inicio del flujo del filtrado. En dicho momento, el espesor de la torta es L (m). El área de corte transversal del filtro es A (m²) y la velocidad lineal del filtrado en la dirección L es v (m/s), con base en el área de filtración A (m²).

Para el flujo laminar en un lecho empacado con partículas la relación de Carman-Kozeny se ha demostrado que es aplicable a la filtración.

$$\frac{\Delta p_c}{L} = \frac{k_1 \mu v (1 - \epsilon)^2 S_0^2}{\epsilon^3} \quad \text{Ecuación 5-1.}$$

Donde se define de la siguiente manera:

k_1 = Constante igual a 4.17 para partículas aleatorias de tamaño y forma definidas.

μ = Viscosidad del filtrado (Pa·s)

v = Velocidad lineal basada en el área de filtración (m/s).

ϵ = Porosidad o fracción de espacios vacíos de la torta.

L = Espesor de la torta (m).

S_0 = Área superficial específica de las partículas en m^2 de área de partícula por m^3 de volumen de partículas sólidas (m^2/m^3).

Δp_c = Caída de presión en la torta (N/m^2)

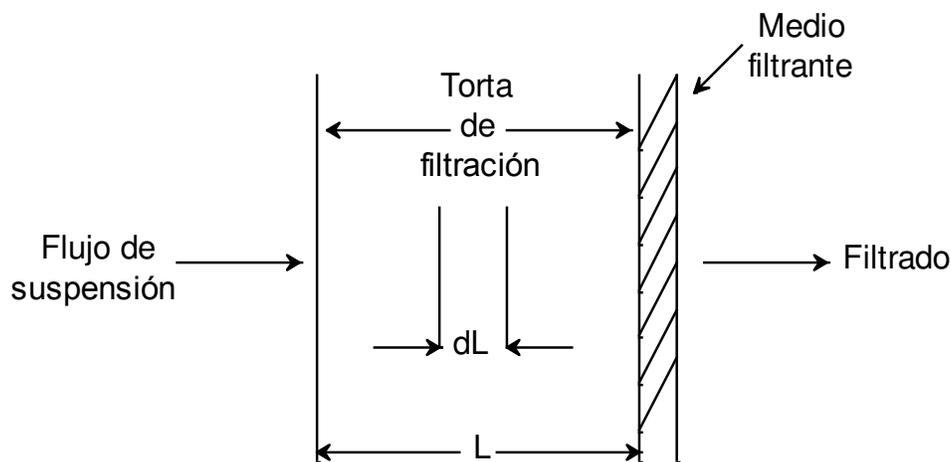


Figura 5-2. Corte transversal de una torta de filtración.

La velocidad lineal es:

$$v = \frac{dV/dt}{A} \quad \text{Ecuación 5-2.}$$

Donde las variables:

A = Área del filtro (m^2).

dV/dt = Total de filtrado recolectado en el tiempo (m^3/s).

El espesor de la torta L puede relacionarse con el volumen de filtrado V , por medio de un balance de materia. Si c_s es kg de sólidos/m³ de filtrado, el balance de materia nos da:

$$LA(1 - \varepsilon)\rho_p = c_s(V + \varepsilon LA) \quad \text{Ecuación 5-3.}$$

Donde ρ_p es la densidad de las partículas sólidas de la torta en kg/m³ de sólido. El término final de la Ecuación 5-3 es el volumen del filtrado retenido en la torta. Éste suele ser pequeño y se desprecia.

Al sustituir la Ecuación 5-2 en la Ecuación 5-1 y al usarla Ecuación 5-3 para eliminar L , se obtiene la ecuación final:

$$v = \frac{dV}{Adt} = \frac{-\Delta p_c}{\left(\frac{k_1(1-\varepsilon)S_0^2}{\rho_p \varepsilon^3}\right)\left(\frac{\mu c_s V}{A}\right)} = \frac{-\Delta p_c}{\alpha \frac{\mu c_s V}{A}} \quad \text{Ecuación 5-4.}$$

α es la resistencia específica de la torta en m/kg y se define como:

$$\alpha = \frac{k_1(1-\varepsilon)S_0^2}{\rho_p \varepsilon^3} \quad \text{Ecuación 5-5.}$$

Para la resistencia del medio filtrante, por analogía con la Ecuación 5-4, se puede escribir la expresión siguiente:

$$\frac{dV}{Adt} = \frac{-\Delta p_f}{\mu Rm} \quad \text{Ecuación 5-6.}$$

Rm es la resistencia del medio filtrante al flujo de filtración en m⁻¹ y Δp_f es la caída de presión. Cuando Rm se trata como constante empírica, incluye tanto la resistencia al flujo en las conexiones de tuberías hacia y desde el filtro como la resistencia del medio filtrante.

Puesto que las resistencias de la torta y del medio filtrante están en serie, se pueden combinar la Ecuación 5-4 y la Ecuación 5-6, con lo que se obtiene:

$$\frac{dV}{Adt} = \frac{-\Delta p}{\mu\left(\frac{\alpha c_s V}{A} + Rm\right)} \quad \text{Ecuación 5-7.}$$

$$\Delta p = \Delta p_f + \Delta p_c \quad \text{Ecuación 5-8.}$$

Algunas veces, la Ecuación 5-7 se modifica de la siguiente manera:

$$\frac{dV}{Adt} = \frac{-\Delta p}{\frac{\mu \alpha c_s}{A}(V+V_e)} \quad \text{Ecuación 5-9.}$$

V_e es el volumen de filtrado necesario para formar una torta de filtración ficticia cuya resistencia sea igual a R_m .

El volumen del filtrado V también se puede relacionar con W , que son los kilogramos de sólido acumulado como torta seca.

$$W = c_s V = \frac{\rho c_x}{1-mc_x} V \quad \text{Ecuación 5-10.}$$

c_x es la fracción de masa de sólido en la suspensión, m es la relación de masa de la torta húmeda respecto a la torta seca y ρ es la densidad del filtrado en kg/m^3 .

La resistencia específica de la torta, según la Ecuación 5-5, está en función de la fracción de espacios huecos (ϵ) y de S_0 . También está en función de la presión, pues ésta puede afectar a ϵ . La variación de α con respecto a Δp se determinará experimentalmente a presión constante con diferentes caídas de presión.

Si α es independiente de $-\Delta p$, los lodos son incompresibles. Por lo general, α aumenta con $-\Delta p$, pues la mayoría de las tortas son algo comprimibles. Una ecuación empírica de uso muy común es:

$$\alpha = \alpha_0 (-\Delta p)^s \quad \text{Ecuación 5-11.}$$

α_0 y s son constantes empíricas. La constante de compresibilidad s es cero para lodos o tortas incompresibles y suele tener valores entre 0.1 y 0.8. Algunas veces se usa la siguiente relación:

$$\alpha = \alpha'_0 [1 + \beta (-\Delta p)^{s'}] \quad \text{Ecuación 5-12.}$$

α'_0 , β y s' son constantes empíricas.

Con frecuencia, las filtraciones se llevan a cabo en condiciones de presión constante en los llamados filtros prensa, con lo cual partimos para las ecuaciones básicas para la velocidad de filtración en los procesos por lotes. La Ecuación 5-7 se puede invertir y reordenar para obtener:

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu \alpha c_s V}{A^2 (-\Delta p)} + \frac{\mu R_m}{A (-\Delta p)} = K_p V + B \quad \text{Ecuación 5-13.}$$

K_p se da en s/m^6 y B en s/m^3 .

$$K_p = \frac{\mu\alpha c_s}{A^2(-\Delta p)} \quad \text{Ecuación 5-14.}$$

$$B = \frac{\mu R_m}{A(-\Delta p)} \quad \text{Ecuación 5-15.}$$

Para presión invariable, α constante y una torta incompresible, V y t son las únicas variables de la Ecuación 5-13. Integrando para obtener el tiempo de filtración t en segundos:

$$\int_0^t dt = \int_0^V (K_p V + B) dV \quad \text{Ecuación 5-16.}$$

$$t = \frac{K_p V^2}{2} + BV \quad \text{Ecuación 5-17.}$$

$$\frac{t}{V} = \frac{K_p V}{2} + B \quad \text{Ecuación 5-18.}$$

V es el volumen total de filtrado en m^3 recolectado en t (s).

Para evaluar la Ecuación 5-17 es necesario conocer α y R_m . Esto se puede hacer usando la Ecuación 5-18. Se obtienen los datos de V recogidos en diferentes tiempos t . Entonces, se grafican los datos experimentales de t/V contra V como en la Figura 5-3. A menudo, el primer punto de la gráfica no cae sobre la línea y se omite. La pendiente de la línea es $K_p/2$ y la intersección, B . Después, se utiliza la Ecuación 5-14 y la Ecuación 5-15 para determinar los valores de α y de R_m respectivamente.

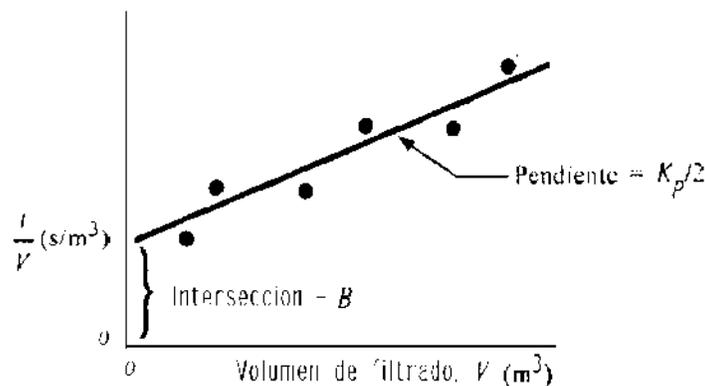


Figura 5-3. Determinación de constantes en una filtración a presión constante.

VI. Metodología.

Descripción del proyecto.

Mediante el uso de un filtro prensa de laboratorio y el uso de un medio filtrante conocido industrialmente como *Fieltro* se llevara a cabo la experimentación necesaria para simular el proceso por el cual se tratará el agua de purga proveniente de los tanques sedimentadores de la planta potabilizadora de Morelia.

Se realizaran distintas corridas experimentales para determinar las condiciones de operación más idóneas y posteriormente escalarlas para el equipo de filtración a nivel industrial para su posible instalación dentro de la planta potabilizadora de esta ciudad. Es de suma importancia mencionar que debido a las limitaciones para el transporte de agua de purga directamente proveniente de los tanques sedimentadores de la planta potabilizadora de Morelia, se utilizará una mezcla de agua con cal, que posee un tamaño similar a las partículas sólidas de arcilla (0.75nm en promedio) que se encuentran en el agua de purga.

Los análisis que se le realizarán a las muestras obtenidas de las corridas experimentales, tanto filtrado como torta (material sólido), serán determinación de sólidos totales y humedad respectivamente; todo esto para determinar la calidad de los productos obtenidos, ya que ambos se consideran valiosos y determinar la capacidad de filtración del medio filtrante del proceso en las variaciones de las condiciones del agua de purga a tratar.

Finalmente se obtendrán las conclusiones correspondientes para este proyecto, todo en base a las corridas experimentales realizadas y los datos recabados, para así evitar el azolvamiento del río Chiquito de Morelia y sobre todo aprovechar esta agua para reintegrarla nuevamente al proceso de tratamiento para potabilizarla y evitar su desperdicio, además de aprovechar el material sólido que se encuentra en esta agua de purga para la elaboración de materiales de ornato y construcción. Adicionalmente, para que el proyecto a nivel industrial se lleve a cabo se propone la construcción de un tanque de almacenamiento, el cuál tendrá la función de contener un volumen poco mayor a 4000m³ de agua de purga proveniente de los tanques sedimentadores de la planta potabilizadora de Morelia, para posteriormente tratarla mediante el proceso de filtración.

Descripción del equipo y material utilizado.

Para la realización de las corridas experimentales se utilizó un equipo de filtración de tipo prensa de marcos y placas de tamaño piloto, el cual está ubicado en el laboratorio pesado del edificio K de Ciudad Universitaria de la ciudad de Morelia. Este equipo de filtración, para su funcionamiento cuenta con:

- Tanque para almacenamiento de la suspensión de alimentación.
- Recirculación en el tanque de almacenamiento de la suspensión de alimentación para homogenizar la suspensión.
- Bomba de 0.8hp.
- Válvula para regular el flujo de suspensión hacia el filtro.
- Marcos.
- Placas.
- Medio filtrante.
- Brida ciega.
- Manómetros de $0\text{kg}_f/\text{cm}^2$ a $2\text{kg}_f/\text{cm}^2$.
- Charola para recolectar filtrado de marcos y placas.
- Válvula para regular el flujo de filtrado.



Figura 6-1. Filtro tipo prensa de marcos y placas utilizado en el proyecto.

Los marcos y placas de este filtro prensa están hechos de acero inoxidable al igual que la brida ciega, la cual es una es una pieza de lámina del tamaño de los marcos y placas, con la cual se determina la cantidad de marcos que se pretenden utilizar para la recolección de sólidos. Los marcos tienen un área para la recolección de sólidos de 751.3cm^2 en cada una de sus caras y un grosor 1.3cm.

El medio filtrante como se ha mencionado anteriormente es conocido industrialmente como *Fieltro*, el cual está constituido de una mezcla de distintos polímeros tales como el Nylon y polietileno, entre otros. Estos polímeros forman un tejido muy pesado el cual permite la separación de los sólidos suspendidos en el proceso.

El medio filtrante resulta ser el más importante para el proceso de filtración, ya que éste es el que permite la separación de suspensión. Para hacer su correcta selección debe tomarse en cuenta el tamaño de las partículas presentes en la suspensión que se desean separar, lo anterior es muy importante debido a que las partículas serán retenidas por el medio filtrante dependiendo del tamaño de poro que esté tenga. Las características adicionales con las que debe contar son: los poros no se deben obstruir con facilidad para que la velocidad del proceso no sea demasiado lenta; debe permitir la extracción de la torta sin dificultades ni pérdidas; final y obviamente, debe tener una resistencia suficiente para no rasgarse y no ser afectado por los productos químicos presentes. El *Fieltro* cumple con estas características y es por eso que ha sido seleccionado para su utilización dentro del proyecto.



Figura 6-2. Muestra del medio filtrante *Fieltro* utilizado durante las corridas experimentales.

El diagrama de flujo del proceso de filtración se muestra a continuación en la Figura 7-3, donde se pueden observar los elementos más representativos del proceso para entender de manera más sencilla el recorrido de la suspensión para obtener el filtrado a nivel laboratorio.

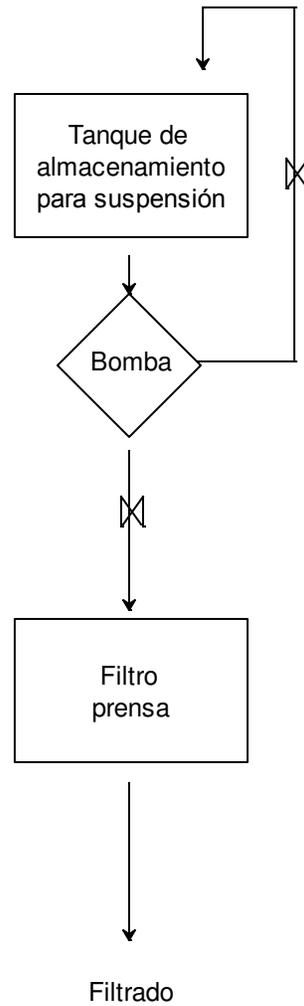


Figura 6-3.Diagrama de flujo para el proceso de filtración en el laboratorio.

VII. Realización y desarrollo de las corridas experimentales.

Procedimiento para la puesta en marcha y operación del filtro tipo prensa.

Para poner en marcha el filtro prensa, primeramente se debe cargar con la suspensión de alimentación el tanque de almacenamiento que abastece al filtro de marcos y placas; lo anterior se hace agregando un volumen de 40L de agua y posteriormente se agrega una determinada cantidad de cal, variando esta cantidad para experimentar y determinar los efectos de la concentración en el proceso de filtración. Debe tenerse cuidado de mantener cerrada la válvula que conecta el tanque de almacenamiento con el filtro prensa y mantener completamente abierta la válvula para la recirculación del tanque de almacenamiento. La recirculación del tanque de almacenamiento tiene la función de homogenizar la mezcla de agua con cal y comienza a trabajar cuando se enciende la bomba, la cual además de generar la circulación envía la suspensión al filtro prensa.

Después de algunos minutos de haber comenzado a recircular la mezcla puede comenzar a abrirse lentamente la válvula que conecta el tanque de almacenamiento con el filtro prensa hasta llegar a una marca ya establecida, esta válvula después de una serie de pruebas y errores se determino la apertura en la cual el filtro podía realizar el proceso de la mejor manera, por lo cual a la válvula se le hicieron una serie de marcas para mantenerla en esos rangos. Las pruebas para esta válvula se realizaron cargando el tanque de alimentación y poniendo en marcha el filtro prensa y modificando la apertura de esta válvula hasta obtener un filtrado claro.

Una vez que se ha abierto la válvula del tanque de alimentación hacia el filtro, la suspensión comenzará a fluir por los marcos y placas, en donde comenzará a filtrarse lentamente por la acción del medio filtrante y formando una torta de los sólidos presentes en esta suspensión y dejando fluir al agua libre de éstos; en todos los casos se tendrá un volumen filtrado recolectado en la charola que se encuentra bajo los marcos y placas, este volumen de filtrado recolectado en la charola es muy parecido en sus características al filtrado obtenido al final del proceso según los análisis de sólidos totales hechos, además es muy importante cuantificarlo para la elaboración de los cálculos referentes a este proceso.

Mientras el proceso de filtración se lleva a cabo deben revisarse los manómetros que se encuentran a la entrada del equipo de filtración y a la salida de éste, con la diferencia de los valores que registren éstos se obtiene la diferencial de presión a la cual trabaja el equipo de filtración. Esta diferencial de presión será muy útil para distintos cálculos que se realizarán posteriormente como la resistencia del medio filtrante y la resistencia específica de la torta. La diferencial de presión no se mantendrá constante durante todo el proceso pero se considerará como constante el valor que haya permanecido por más tiempo.

Debe ponerse especial atención en los medios filtrantes ya que deben estar correctamente colocados entre los marcos y placas como se muestra en la Figura 4-4, además estos medios filtrantes de *Fieltro*, en particular, tienen un frente y un revés muy similares, y si no son puestos con su cara frontal hacia el marco la filtración no se realizará correctamente y se obtendrá un filtrado turbio dando una corrida experimental no satisfactoria y por lo tanto se repetirá hasta obtener una corrida experimental válida.

Finalmente, ya que la suspensión haya pasado por todos los marcos y placas comenzará a obtenerse el filtrado, que para dar como válida la corrida experimental, el filtrado debe ser claro. La corrida experimental finalizará hasta que todo el tanque de almacenamiento se haya vaciado por completo. Este filtrado también se cuantificará respecto al tiempo para realizar la regresión lineal absolutamente necesaria para la parte de los cálculos.

Análisis realizados.

Los análisis hechos tanto al filtrado como a la torta son muy importantes, con ellos se conoce la calidad del proceso. Con el análisis del filtrado conoceremos la capacidad de filtración del material filtrante *Fieltro*, con esto obtendremos una conclusión muy importante y necesaria para todo este proyecto. Haciendo los análisis correspondientes para la torta conoceremos la cantidad de agua que permanece dentro de este material sólido.

La calidad del proceso estará directamente determinada por la calidad del filtrado obtenido, por lo tanto los análisis para el filtrado tendrán mayor relevancia que los análisis para la torta.

Para el filtrado el análisis correspondiente será el de sólidos totales, el cual consiste en pesar una muestra de filtrado hasta evaporarla por completo y finalmente pesar tal muestra para determinar el contenido de material sólido presente en la muestra inicial. El procedimiento por el cual se realiza tal análisis es el siguiente:

- Pesar una cápsula de porcelana (W_p).
- Pesar la cápsula de porcelana con una cantidad de filtrado (W_{pf}).
- Llevar la cápsula de porcelana con filtrado a una estufa, para evaporar el agua presente en la muestra, por alrededor de 12 horas.
- Posteriormente se coloca la cápsula de porcelana en un desecador, en donde se estabilizara su contenido de humedad, aproximadamente por una hora.
- Una vez concluido este periodo de tiempo se procede a pesar la cápsula de porcelana con la muestra restante (W_s).
- Concluyendo el análisis, se realiza el cálculo con la Ecuación 7-1 y se obtiene el porcentaje de sólidos totales.

$$\%S_T = \frac{W_s - W_p}{W_{pf} - W_p} \times 100 \quad \text{Ecuación 7-1.}$$

El análisis para la torta será el de humedad, con el cual como se había mencionado antes, se conocerá la cantidad de agua retenida en el material sólido que se retuvo en los marcos, lo anterior es de utilidad ya que con ello podremos realizar el balance de masa correspondiente para el proceso de filtración además de determinar las posibles condiciones con las cuales se obtendrá esta torta y darle el tratamiento pertinente.

El procedimiento para el análisis de humedad es muy similar al análisis de sólidos totales, pero en lugar de tener en mayor cantidad un líquido se tiene un sólido, el cual tiene en muy poca proporción un líquido. El análisis consiste en:

- Pesar una cápsula de porcelana (W_p).
- Pesar la cápsula de porcelana con una cantidad de torta (W_{pt}).
- Llevar la cápsula de porcelana con torta a una estufa, para evaporar el agua presente en la muestra, por alrededor de 6 horas.
- Posteriormente se coloca la cápsula de porcelana en un desecador, en donde se estabilizara su contenido de humedad, aproximadamente por una hora.
- Una vez concluido este periodo de tiempo se procede a pesar la cápsula de porcelana con la muestra restante (W_s).
- Concluyendo el análisis, se realiza el cálculo con la Ecuación 7-2 y se obtiene el porcentaje de humedad presente en la muestra.

$$\%H = \left(1 - \frac{W_s - W_p}{W_{pt} - W_p} \right) \times 100 \quad \text{Ecuación 7-2.}$$

En el análisis para la torta debe tenerse especialmente cuidado, debido a que si es mucho el periodo de tiempo entre la recolección de la muestra y la realización del análisis, los resultados podrían variar bastante por acción de la temperatura y humedad del ambiente, modificando el contenido de agua presente en la muestra. En el análisis de sólidos totales no es muy apreciable este efecto.

Todos estos análisis se llevarán a cabo en todas las corridas experimentales, siempre y cuando la corrida experimental haya sido válida, esto es, cuando el filtrado obtenido sea claro y por lo tanto hubo una buena filtración y una buena colocación de los medios filtrantes en cuanto a sus caras.

Consideraciones para las corridas experimentales.

- No se utilizará agua de purga proveniente de los tanques sedimentadores de la planta potabilizadora de Morelia debido a las limitaciones de transporte para ésta.
- Se utilizará una suspensión de agua con cal durante toda la etapa de experimentación. Esto en base a que el tamaño de las partículas de cal y las partículas de arcilla presentes en el agua de purga de los tanques sedimentadores es muy similar.
- La válvula para la recirculación siempre permanecerá en la misma posición, completamente abierta.

- La válvula que conecta el tanque de almacenamiento con el filtro prensa sólo se abrirá hasta la marca hecha sobre ella en toda la experimentación, ya que demostró dar resultados este porcentaje de apertura para obtener el filtrado claro.
- Se utilizarán dos marcos en todas las corridas experimentales.
- La cantidad de agua en la suspensión será constante en todos los casos, siendo de 40L.
- La cantidad de cal irá desde 100g hasta 1500g con incrementos de 100g, para simular condiciones poco saturadas y muy saturadas de la suspensión y conocer los efectos sobre el proceso.
- Para concluir la corrida experimental deberá haberse vaciado completamente el tanque de almacenamiento.
- El último dato de tiempo registrado será cuando el flujo de filtrado sea mínimo y poco uniforme (goteo).

Tabla 7-1.Relación de agua con cal.

Volumen de agua (L)	Cantidad de cal (g)	Concentración (gCal/LAgua)
40	100	2.5
40	200	5.0
40	300	7.5
40	400	10.0
40	500	12.5
40	600	15.0
40	700	17.5
40	800	20.0
40	900	22.5
40	1000	25.0
40	1100	27.5
40	1200	30.0
40	1300	32.5
40	1400	35.0
40	1500	37.5

VIII. Resultados.

Los resultados obtenidos de las corridas experimentales se pueden observar en las tablas siguientes, donde se encuentran los datos experimentales recolectados a lo largo de las corridas experimentales hechas dentro del laboratorio, se separan según la concentración de la suspensión de alimentación y se muestran los resultados de los análisis realizados y algunos datos adicionales.

Las diferenciales de presión para todos los casos se encontraron alrededor de $0.2\text{kg}_f/\text{cm}^2$, es por ello que se tomo como constante este valor para toda la experimentación. Las variaciones de la diferencial de presión eran mínimas durante el proceso de filtración, sólo descendían hasta el final de las pruebas.

La velocidad de flujo con la cual se estuvo alimentando, según la apertura ya establecida por medio de una serie de marcas en la válvula que conecta el tanque de almacenamiento con el filtro, se obtuvo realizando distintas mediciones las cuales se representa en la Tabla 8-1, donde se observan los datos recolectados y finalmente el promedio de éstos para determinar la velocidad de flujo promedio a la cual se alimentaba la suspensión al filtro.

Tabla 8-1. Velocidad de flujo de suspensión alimentada al filtro.

Volumen (mL)	Tiempo (s)	Velocidad de flujo (mL/s)
660	14.34	46.025
647	14.90	43.422
690	11.56	59.688
608	10.22	59.491
640	10.10	63.366
650	10.32	62.984
570	9.19	62.023
596	9.53	62.539
729	11.75	62.042

La velocidad de flujo promedio para la suspensión alimentada al filtro fue de 57.953mL/s.

Tabla 8-2.

Tabla 8-3.

Tiempo (s)	Volumen acumulado recolectado $\times 10^{-3}$ (m ³)	Alimentación 2.5gCal/LAgua	Tiempo (s)	Volumen acumulado recolectado $\times 10^{-3}$ (m ³)	Alimentación 5.0gCal/LAgua
		Agua recolectada en charola (L)			Agua recolectada en charola (L)
26	0.91		26	0.93	
48	1.77	3.57	47	1.82	2.85
73	2.71	%S _T	70	2.73	%S _T
95	3.58	0.111	93	3.67	0.121
121	4.53	%H	117	4.61	%H
145	5.45	55	140	5.54	71
169	6.38		166	6.49	
193	7.28		190	7.41	
218	8.23		216	8.34	
243	9.13		242	9.21	
268	10.07		272	10.14	
294	11.02		302	11.04	
320	11.98		337	12.00	
345	12.88		368	12.89	
372	13.85		402	13.83	
398	14.77		434	14.71	
425	15.67		469	15.67	
1241	34.43		501	16.53	
			1399	34.35	

Tabla 8-4.

Tiempo (s)	Volumen acumulado recolectado $\times 10^{-3}$ (m ³)	Alimentación 7.5gCal/LAgua
23	0.90	Agua recolectada en charola (L)
41	1.79	4.00
61	2.74	%S _T
80	3.68	0.123
100	4.62	%H
120	5.57	67
140	6.52	
159	7.46	
180	8.43	
201	9.45	
223	10.43	
244	11.36	
265	12.31	
286	13.20	
309	14.16	
330	15.05	
352	15.99	
992	33.75	

Tabla 8-5.

Tiempo (s)	Volumen acumulado recolectado $\times 10^{-3}$ (m ³)	Alimentación 10.0gCal/LAgua
33	0.90	Agua recolectada en charola (L)
60	1.80	7.28
89	2.71	%S _T
118	3.62	0.163
147	4.54	%H
177	5.44	60
208	6.37	
237	7.25	
269	8.21	
297	9.10	
330	10.07	
360	10.96	
394	11.91	
425	12.78	
459	13.70	
492	14.59	
526	15.51	
1472	32.63	

Tabla 8-6.

Tiempo (s)	Volumen recolectado $\times 10^{-3}$ (m ³)	Alimentación 12.5gCal/LAgua Agua recolectada en charola (L)	Tiempo (s)	Volumen recolectado $\times 10^{-3}$ (m ³)	Alimentación 15.0gCal/LAgua Agua recolectada en charola (L)
37	0.87		28	0.86	
71	1.75	4.28	54	1.77	4.42
108	2.68	%S _T	82	2.66	%S _T
145	3.59	0.103	108	3.55	0.160
183	4.53	%H	134	4.41	%H
219	5.43	62	160	5.28	59
258	6.40		189	6.24	
296	7.33		216	7.15	
335	8.30		246	8.09	
371	9.18		275	9.02	
410	10.12		303	9.95	
449	11.04		331	10.83	
490	11.99		365	11.78	
528	12.88		397	12.65	
569	13.80		425	13.51	
606	14.67		1433	32.92	
1652	32.67				

Tabla 8-7.

Tabla 8-8.

Tabla 8-9.

Tiempo (s)	Volumen acumulado recolectado $\times 10^{-3}$ (m³)	Alimentación 17.5gCal/LAgua	Tiempo (s)	Volumen acumulado recolectado $\times 10^{-3}$ (m³)	Alimentación 20.0gCal/LAgua
		Agua recolectada en charola (L)			Agua recolectada en charola (L)
32	0.91	4.71	39	0.85	5.42
61	1.81	%S_T	75	1.72	%S_T
90	2.73	0.172	111	2.63	0.195
120	3.65	%H	144	3.49	%H
151	4.60	54	176	4.30	52
180	5.53		210	5.18	
212	6.48		248	6.12	
243	7.43		282	7.00	
275	8.39		320	7.95	
307	9.31		353	8.79	
342	10.24		393	9.76	
374	11.14		430	10.64	
408	12.01		468	11.53	
445	12.93		505	12.41	
1608	33.73		1542	30.64	

Tabla 8-10.

Tiempo (s)	Volumen acumulado recolectado $\times 10^{-3}$ (m ³)	Alimentación 22.5gCal/LAgua
		Agua recolectada en charola (L)
35	0.86	5.71
60	1.62	%S_T
90	2.51	0.180
118	3.34	%H
150	4.20	52
184	5.06	
220	5.92	
256	6.77	
295	7.69	
334	8.57	
374	9.48	
414	10.34	
458	11.23	
501	12.07	
549	12.98	
594	13.84	
1927	32.02	

Tabla 8-11.

Tiempo (s)	Volumen acumulado recolectado $\times 10^{-3}$ (m ³)	Alimentación 25.0gCal/LAgua
		Agua recolectada en charola (L)
24	0.86	5.57
41	1.66	%S_T
60	2.60	0.140
79	3.57	%H
99	4.49	51
119	5.45	
138	6.39	
156	7.28	
176	8.22	
195	9.13	
216	10.09	
235	10.99	
258	12.03	
280	12.96	
302	13.90	
324	14.83	
1163	33.01	

Tabla 8-12.

Tiempo (s)	Volumen acumulado recolectado $\times 10^{-3}$ (m ³)	Alimentación 27.5gCal/LAgua
38	0.87	Agua recolectada en charola (L)
70	1.71	6.71
104	2.58	%S_T
136	3.44	0.176
167	4.29	%H
197	5.15	51
231	6.08	
260	6.95	
291	7.85	
321	8.73	
352	9.65	
382	10.51	
416	11.44	
447	12.28	
482	13.20	
511	13.98	
1474	31.04	

Tabla 8-13.

Tiempo (s)	Volumen acumulado recolectado $\times 10^{-3}$ (m ³)	Alimentación 30.0gCal/LAgua
27	0.82	Agua recolectada en charola (L)
49	1.65	6.57
74	2.56	%S_T
97	3.44	0.133
123	4.36	%H
146	5.22	52
173	6.14	
197	6.98	
224	7.90	
249	8.77	
277	9.69	
303	10.54	
333	11.44	
361	12.26	
391	13.15	
418	13.96	
1416	32.19	

Tabla 8-14.

Tiempo (s)	Volumen acumulado recolectado x10⁻³ (m³)	Alimentación 32.5gCal/LAgua
28	0.83	Agua recolectada en charola (L)
55	1.78	6.28
81	2.69	%S _T
103	3.59	0.160
128	4.50	%H
148	5.26	50
172	6.13	
196	7.01	
221	7.94	
242	8.71	
266	9.58	
289	10.42	
314	11.29	
337	12.10	
359	12.83	
385	13.70	
1406	32.47	

Tabla 8-15.

Tiempo (s)	Volumen acumulado recolectado x10⁻³ (m³)	Alimentación 35.0gCal/LAgua
30	0.85	Agua recolectada en charola (L)
56	1.71	6.71
83	2.58	%S _T
115	3.55	0.150
144	4.46	%H
169	5.27	49
198	6.11	
224	6.96	
250	7.81	
279	8.70	
306	9.54	
335	10.41	
364	11.26	
394	12.12	
426	13.02	
453	13.76	
1573	30.28	

Tabla 8-16.

Tiempo (s)	Volumen acumulado recolectado x10⁻³ (m³)	Alimentación 37.5gCal/LAgua	Tiempo (s)	Volumen acumulado recolectado x10⁻³ (m³)	Alimentación 50.0gCal/LAgua
34	0.87	Agua recolectada en charola (L)	30	0.92	Agua recolectada en charola (L)
67	1.76	11.99	58	1.79	5.85
112	2.62	%S _T	93	2.70	%S _T
174	3.45	0.150	130	3.55	0.206
232	4.32	%H	173	4.49	%H
266	5.13	52	215	5.40	50
360	5.99		255	6.32	
423	6.78		295	7.22	
491	7.63		335	8.16	
554	8.41		373	9.03	
633	9.29		427	9.93	
715	10.13		520	10.8	
807	10.96		544	11.72	
896	11.78		574	12.59	
1861	17.72		611	13.53	
			645	14.40	
			2620	27.05	

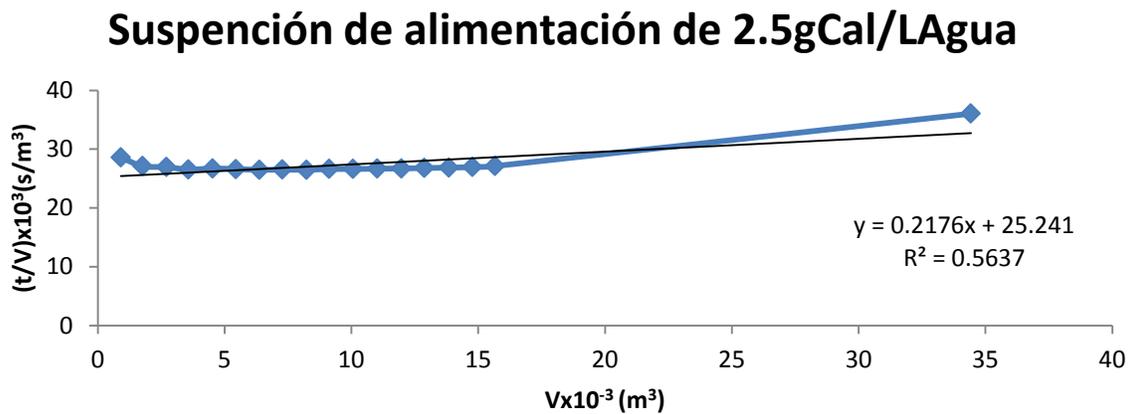
Tabla 8-17.

*Las tablas anteriores de la sección VII, esta sección y en adelante son de elaboración propia.

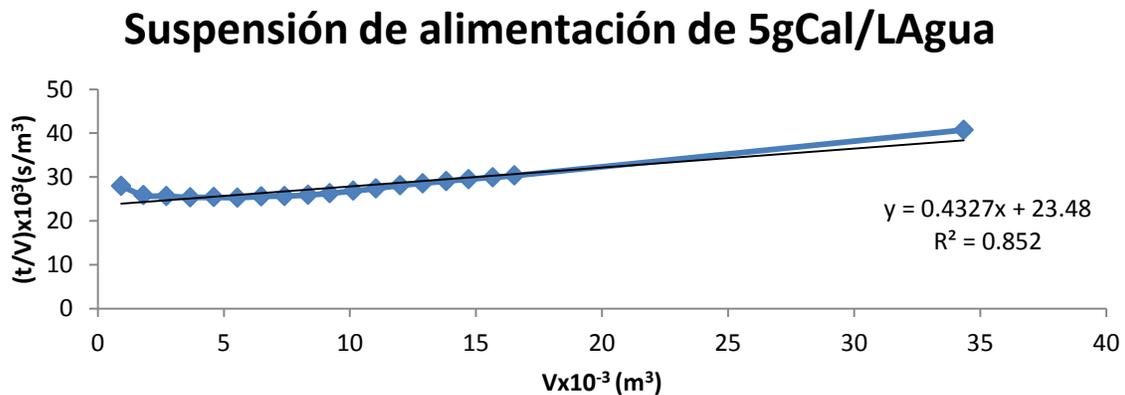
IX. Cálculos.

Siguiendo la metodología de la teoría básica de la filtración, descrita anteriormente, se realiza una regresión lineal, con la cual determinaremos qué concentración de la suspensión de alimentación es la que se comporta de mejor manera en base a su factor de correlación. La gráfica con el factor de correlación más cercano a 1 resultará la más idónea para realizar todos los cálculos pertinentes a este proyecto. A continuación se muestran las gráficas:

Gráfica 9-1.

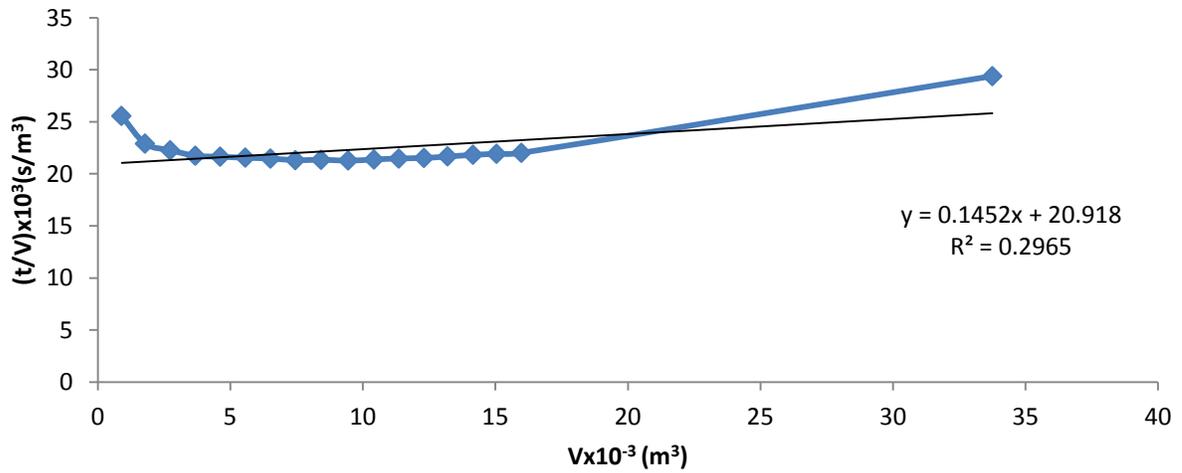


Gráfica 9-2.



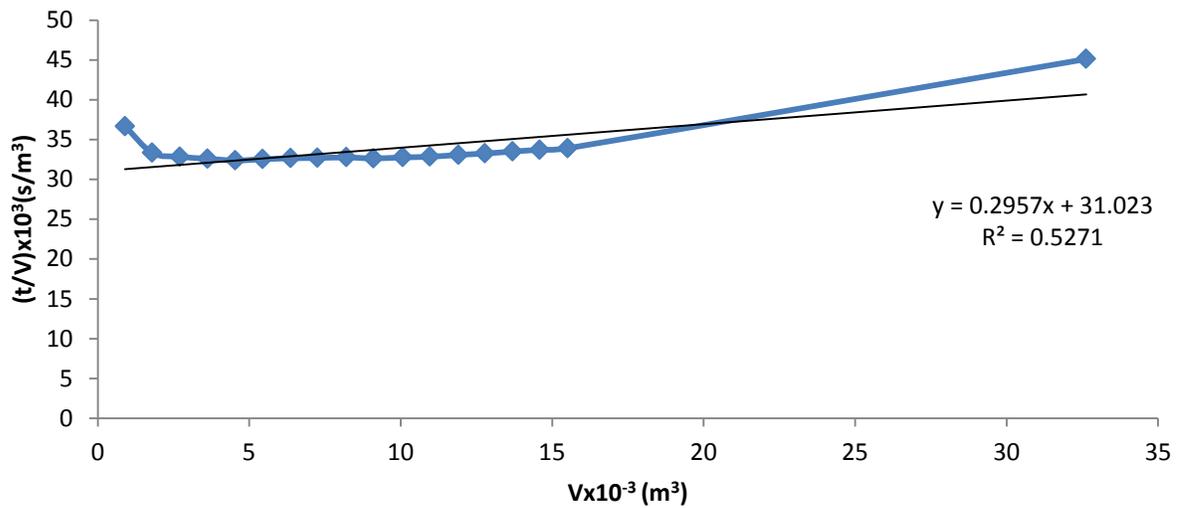
Gráfica 9-3.

Suspensión de alimentación de 7.5gCal/LAgua

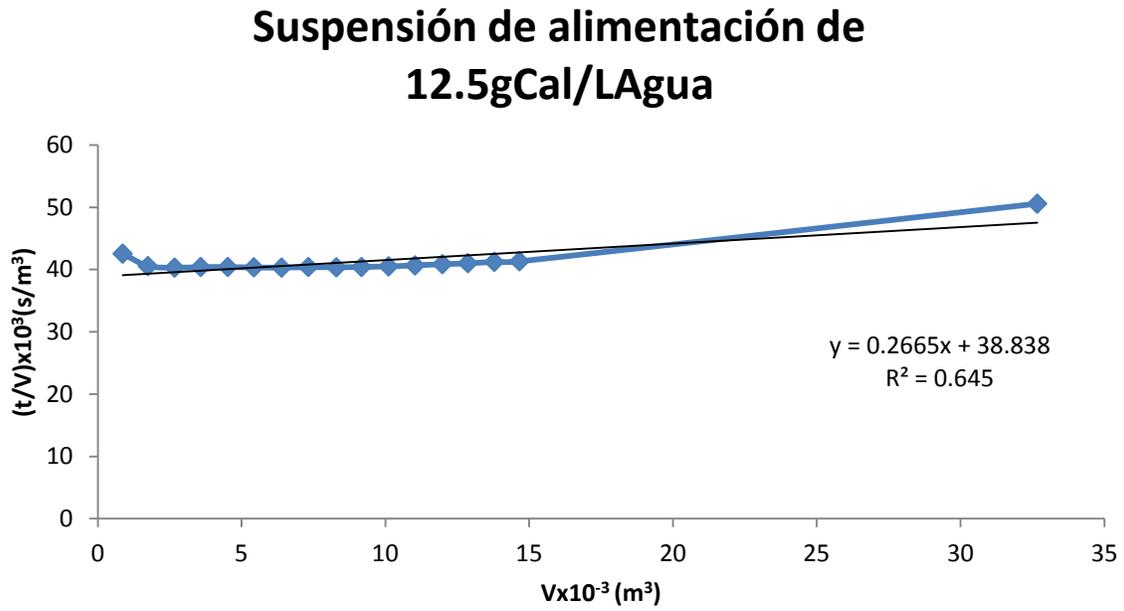


Gráfica 9-4.

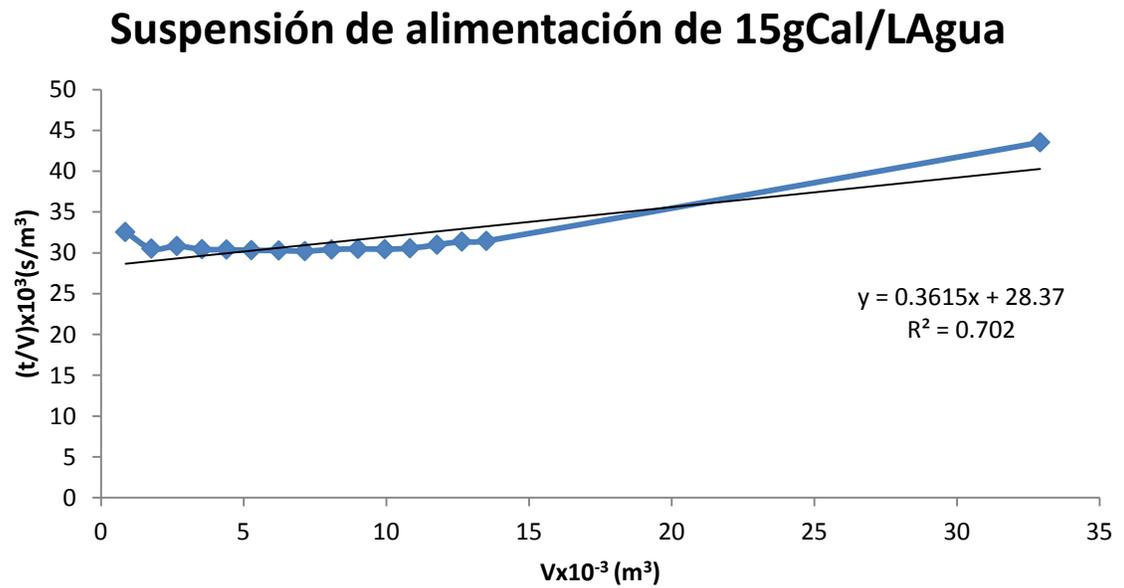
Suspensión de alimentación de 10gCal/LAgua



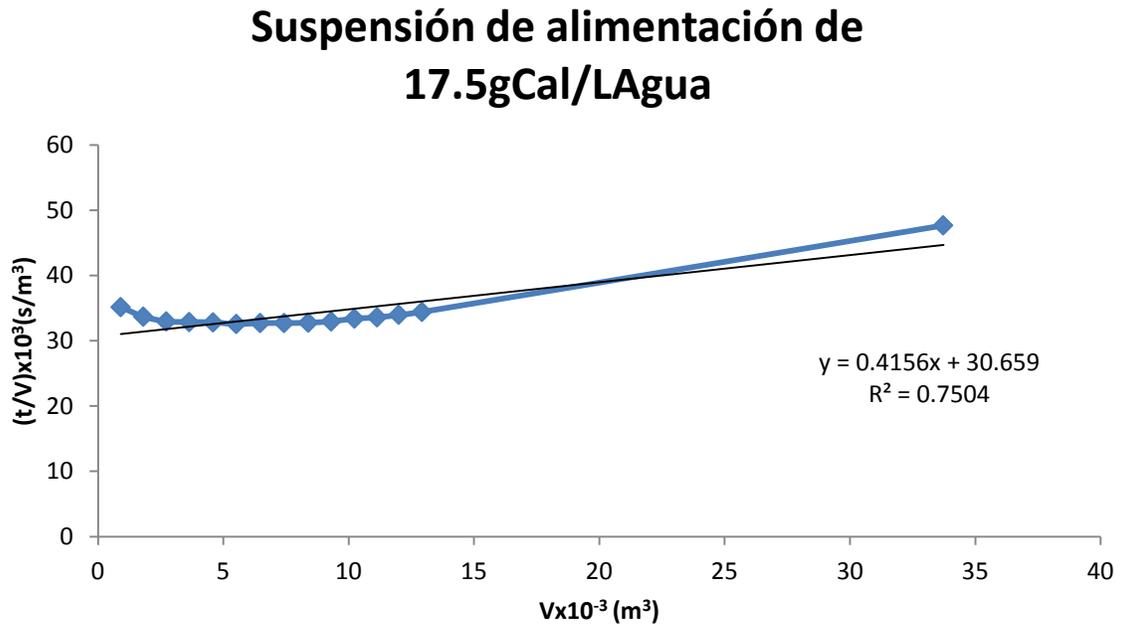
Gráfica 9-5.



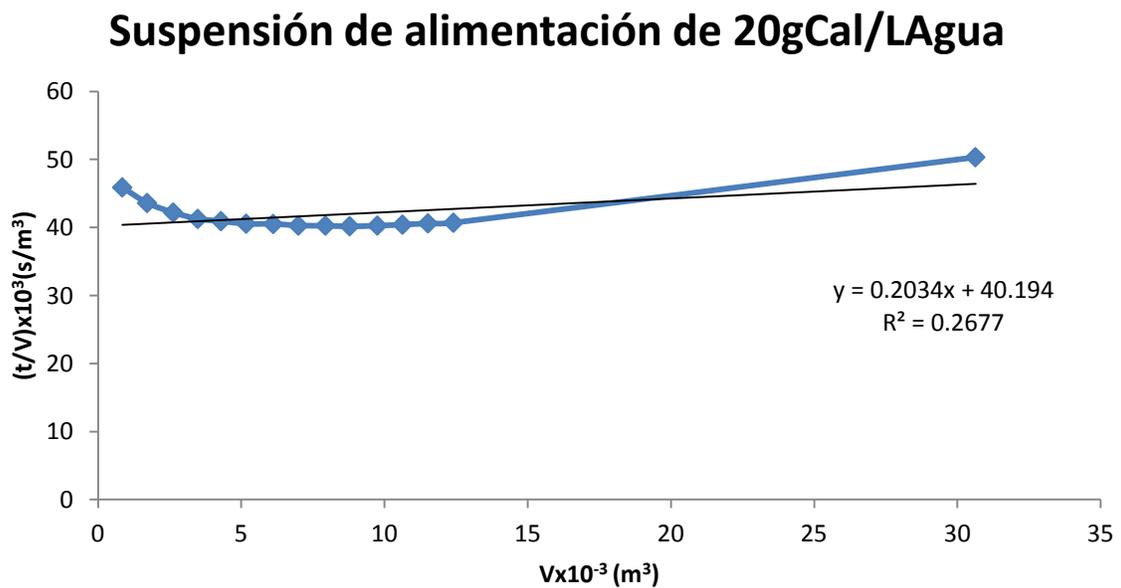
Gráfica 9-6.



Gráfica 9-7.

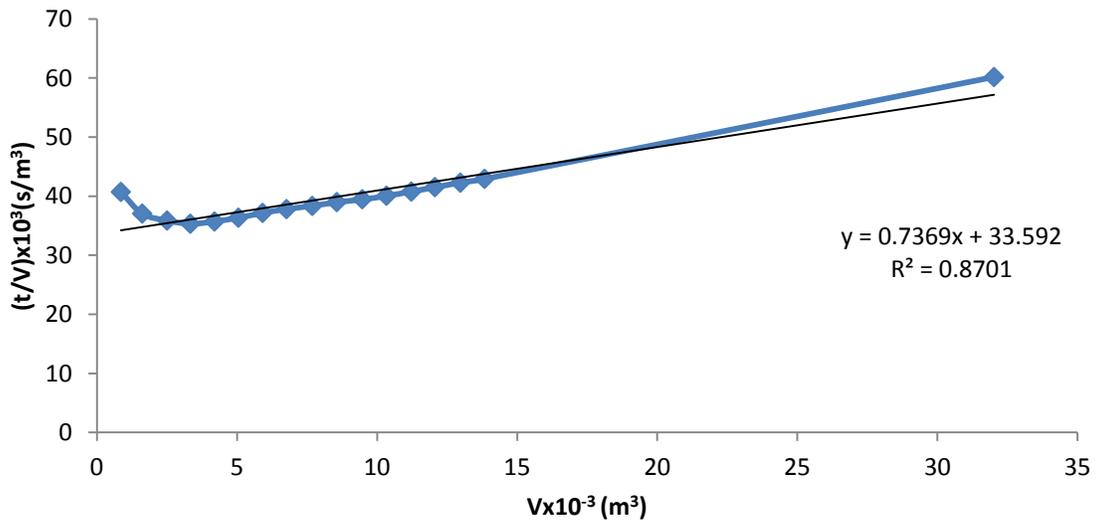


Gráfica 9-8.



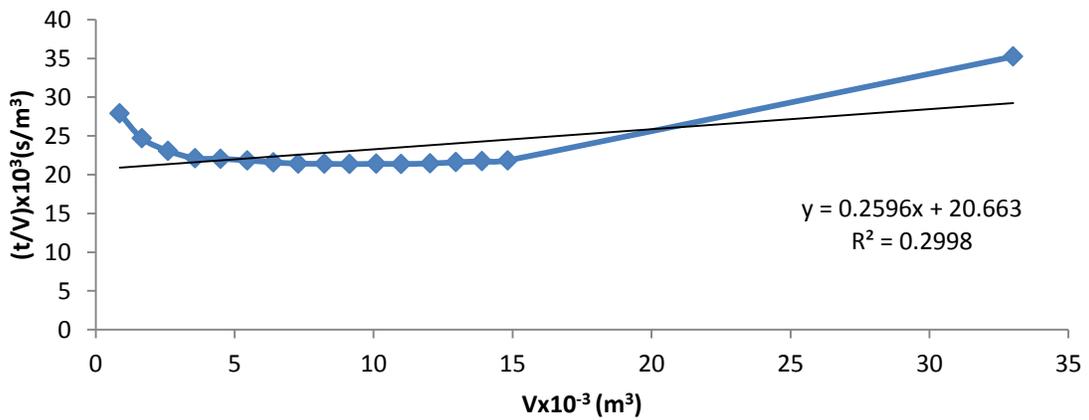
Gráfica 9-9.

Suspensión de alimentación de 22.5gCal/LAgua

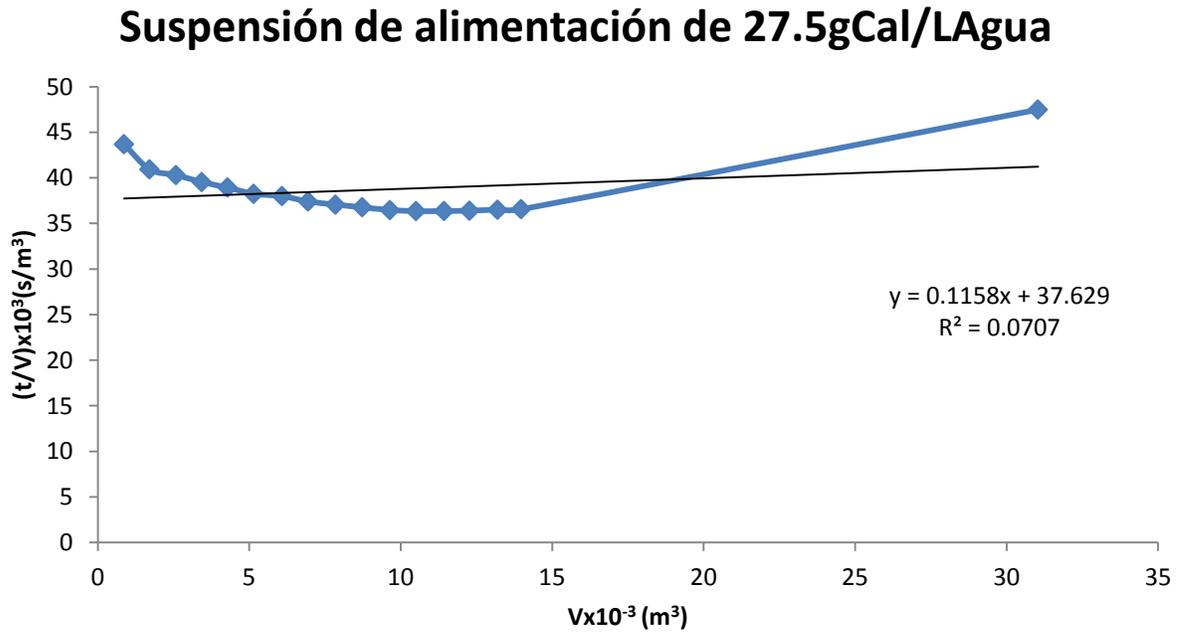


Gráfica 9-10.

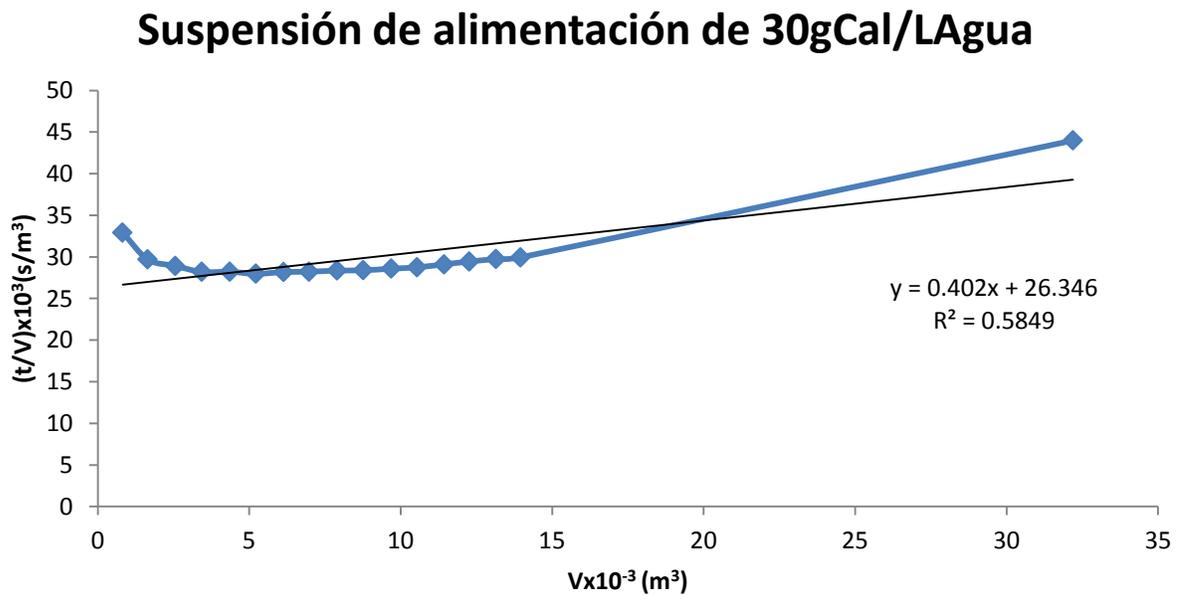
Suspensión de alimentación de 25gCal/LAgua



Gráfica 9-11.

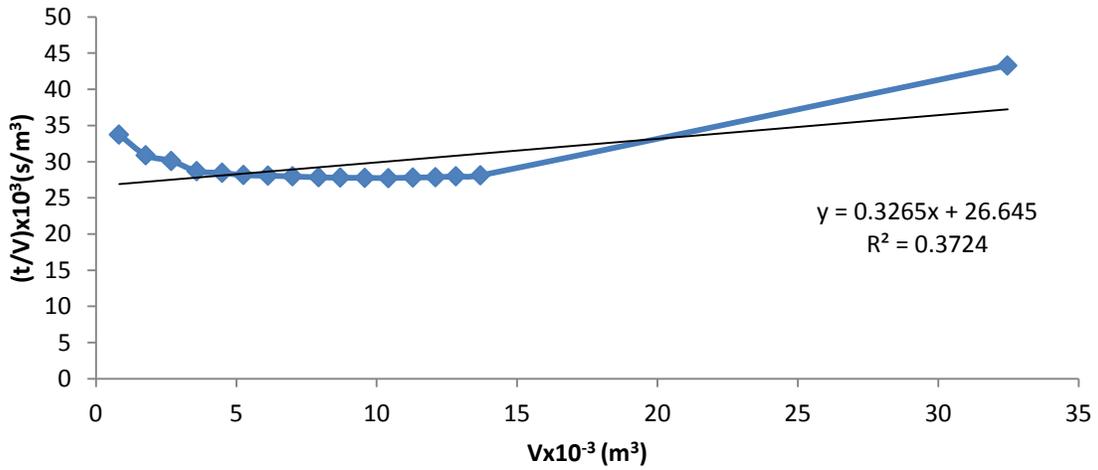


Gráfica 9-12.



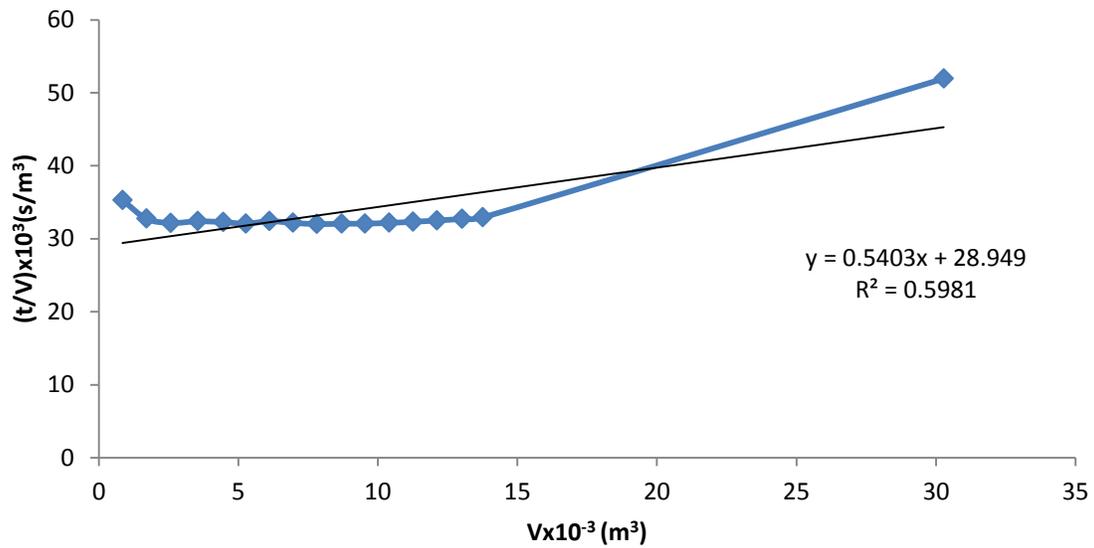
Gráfica 9-13.

Suspensión de alimentación de 32.5gCal/LAgua

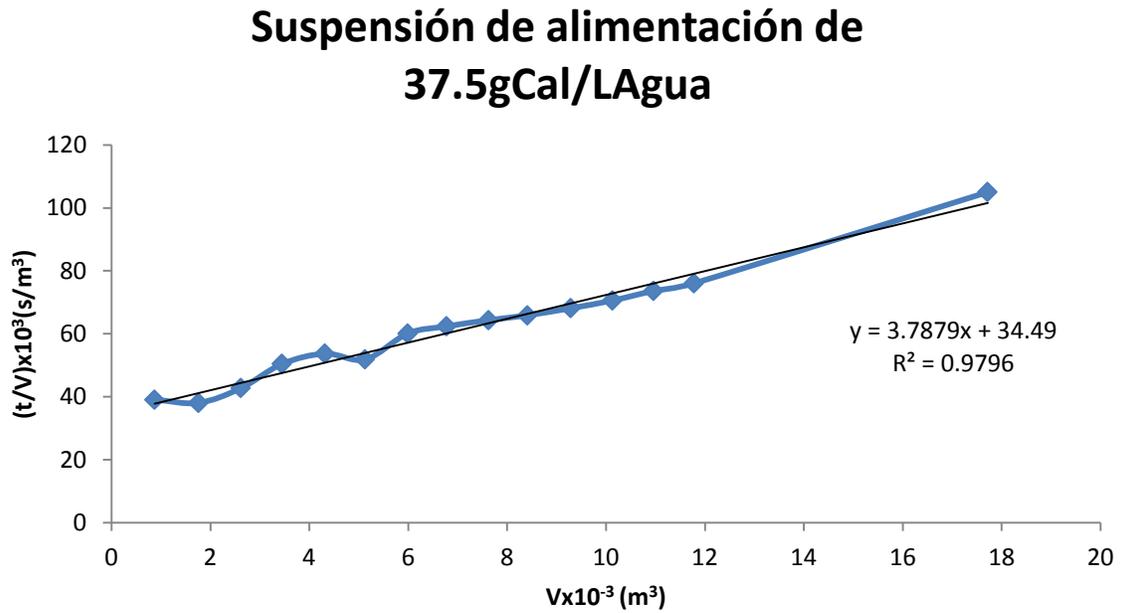


Gráfica 9-14.

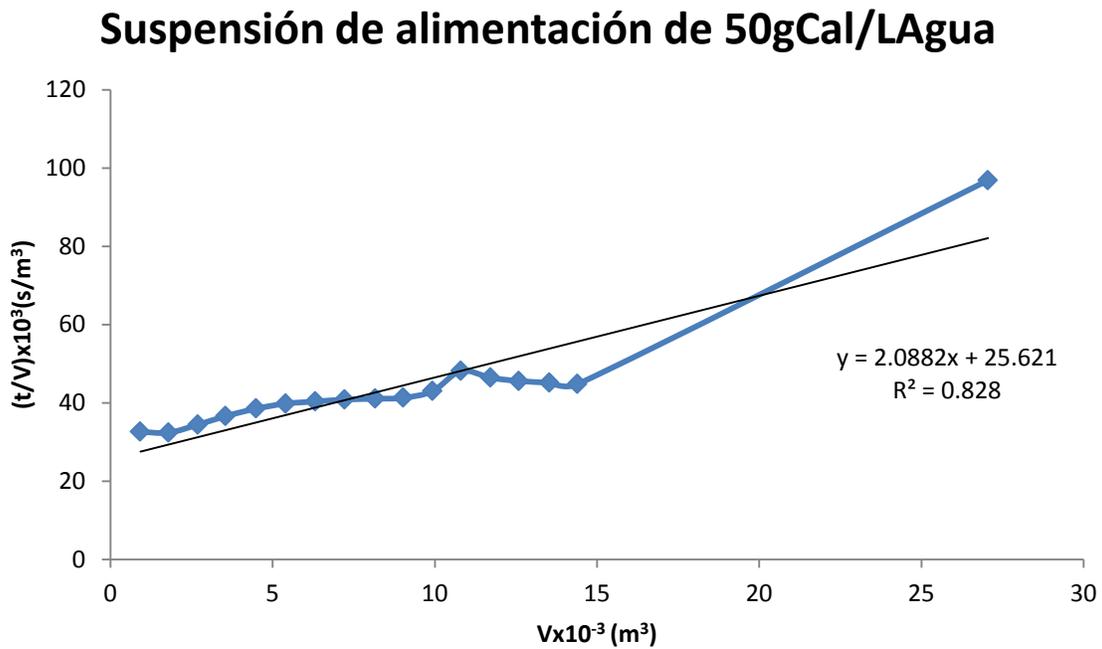
Suspensión de alimentación de 35gCal/LAgua



Gráfica 9-15.

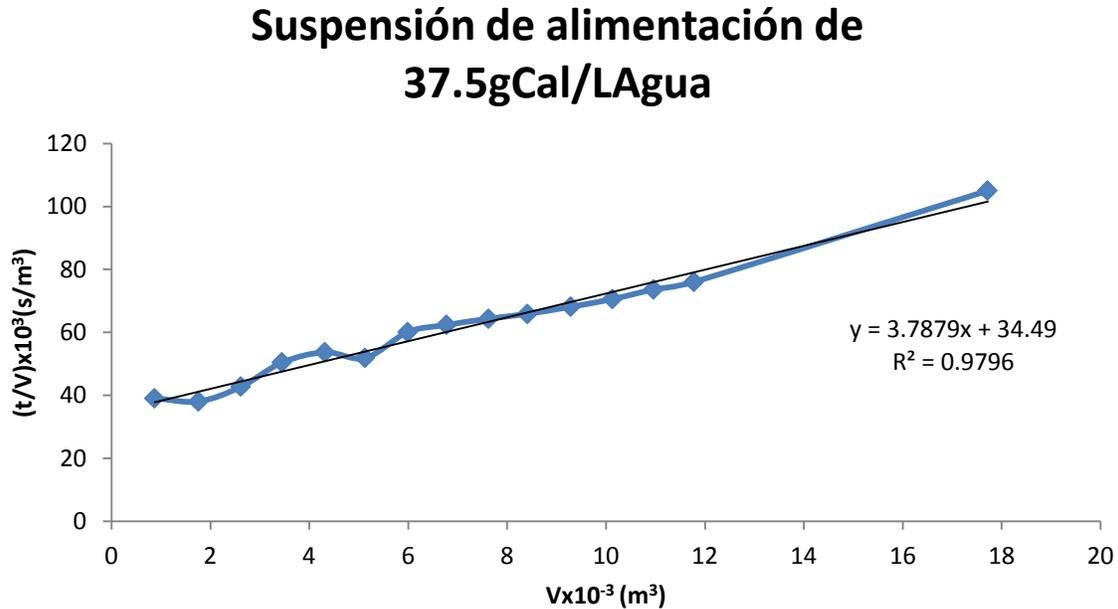


Gráfica 9-16.



Analizando el factor de correlación (R^2) de cada regresión, el mejor de ellos resulta ser el de la Gráfica 9-15, con valor de 0.9796. Esta concentración de suspensión de alimentación será la utilizada en todos los cálculos posteriores, ya que mantiene el mejor comportamiento a lo largo de toda la prueba.

Gráfica 9-15.



La siguiente etapa se realiza por medio de la pendiente (m) de la línea siendo iguala $K_p/2$ y la intersección (b) que es igual a B . Después, se utiliza la Ecuación 5-14 y la Ecuación 5-15 para determinar los valores de α y de R_m respectivamente.

$$m = \frac{K_p}{2} \quad \text{Ecuación 9-1.}$$

Ajustando la Ecuación 10-1 para despejar K_p obtenemos:

$$K_p = 2m \quad \text{Ecuación 9-2.}$$

Realizando el cálculo de esta ecuación resulta:

$$K_p = 2 \left(3.7879 \times 10^6 \frac{s}{m^6} \right) = 7.5758 \times 10^6 \frac{s}{m^6}$$

Para la intersección se realiza el siguiente procedimiento:

$$\mathbf{b = B} \quad \text{Ecuación 9-3.}$$

$$\mathbf{B = 34.49 \times 10^3 \frac{s}{m^3}}$$

Reajustando la Ecuación 5-14 y la Ecuación 5-15 para conocer α y R_m respectivamente, se tiene lo siguiente:

$$\alpha = \frac{K_p A^2 (-\Delta p)}{\mu c_s} \quad \text{Ecuación 9-4.}$$

$$R_m = \frac{BA(-\Delta p)}{\mu} \quad \text{Ecuación 9-5.}$$

Resolviendo las ecuaciones anteriores resulta lo siguiente:

$$\alpha = \frac{\left(7.5758 \times 10^6 \frac{s}{m^6}\right) (4 \cdot 0.07513m^2)^2 \left(19614 \frac{N}{m^2}\right)}{\left(0.001 \frac{kg}{sm}\right) \left(39.919 \frac{kg}{m^3}\right)} = 3.3617 \times 10^{11} \frac{m}{kg}$$

La concentración de la suspensión, para una mayor precisión, es la relación de masa de sólido de la suspensión retenida en el medio filtrante por el volumen de filtrado obtenido de la prueba (kgsólido retenido/m³ filtrado recuperado). Los datos obtenidos para esta relación fueron:

$$c_s = \frac{1.186kg}{29.71L} = 39.919 \times 10^{-3} \frac{kg}{L} = 39.919 \frac{kg}{m^3}$$

La resistencia del medio filtrante al flujo de filtración es la siguiente:

$$R_m = \frac{\left(34.49 \times 10^3 \frac{s}{m^3}\right) (4 \cdot 0.07513m^2) \left(19614 \frac{N}{m^2}\right)}{0.001 \frac{kg}{sm}} = 2.0329 \times 10^{11} m^{-1}$$

Con los valores α y R_m calculados, se procede a evaluar la Ecuación 5-17 para conocer el tiempo de filtración en función al número de marcos de tamaño industrial. Estos marcos industriales tienen un área para la recolección de sólidos de 1m² en cada una de sus caras. En la Tabla 9-1 se muestra la relación entre el número de marcos de tamaño industrial y el tiempo de filtración calculado.

La concentración de la suspensión es de 31.4kg/m^3 , siendo ésta la concentración del agua de purga de proveniente de los tanques sedimentadores de la planta potabilizadora de Morelia. El volumen que se utiliza en la Ecuación 5-17 es $2.777\text{m}^3/\text{min}$, que se obtiene de dividir el flujo de $4000\text{m}^3/\text{día}$ a horas y después a minutos.

A continuación se muestra la manera en que se realizó el cálculo del tiempo de filtración para 10 marcos, los demás cálculos de tiempo de filtración se realizarían de manera similar pero con sus respectivas variables

$$t = \frac{1345.4354\text{s/m}^6(2.777\text{m}^3)^2}{2} + 518.24\text{s/m}^3(2.777\text{m}^3)$$

$$t = 6630.29\text{s} = 110.50\text{min}$$

Tabla 9-1. Tiempo de filtración en función del número de marcos de tamaño industrial.

Número de marcos	K_p (s/m^6)	B (s/m^3)	Tiempo (s)	Tiempo (min)
10	1345.4354	518.24	6630.29	110.50
20	336.3588	259.12	2017.46	33.62
30	149.4928	172.74	1056.60	17.61
40	84.0897	129.56	684.31	11.40
50	53.8174	103.64	495.54	8.25

Observando la tabla anterior se selecciona como número idóneo de marcos el de 20, lo anterior debido a que es el punto más cercano a la intersección de las curvas de los costos fijos con los costos variables y por lo tanto es económicamente el más aceptable por su inversión y beneficio. Cualquier otra propuesta para calcular el tiempo de filtración en función del número de marcos de tamaño industrial dentro del rango anterior se podría predecir con la gráfica correspondiente de estos datos.

En este caso no tendríamos un tiempo de lavado para la torta, ya que en el proceso no es necesario, por lo tanto el tiempo total de operación sería de alrededor de 45 minutos, añadiéndole de 10 minutos hasta 15 minutos de tiempo de descarga.

La parte final para el proceso a nivel industrial es determinar la potencia necesaria de la bomba que se encargará de alimentar el equipo de filtración. En base a la Figura 9-1 se determinarán las características necesarias de la bomba según las condiciones del proceso.

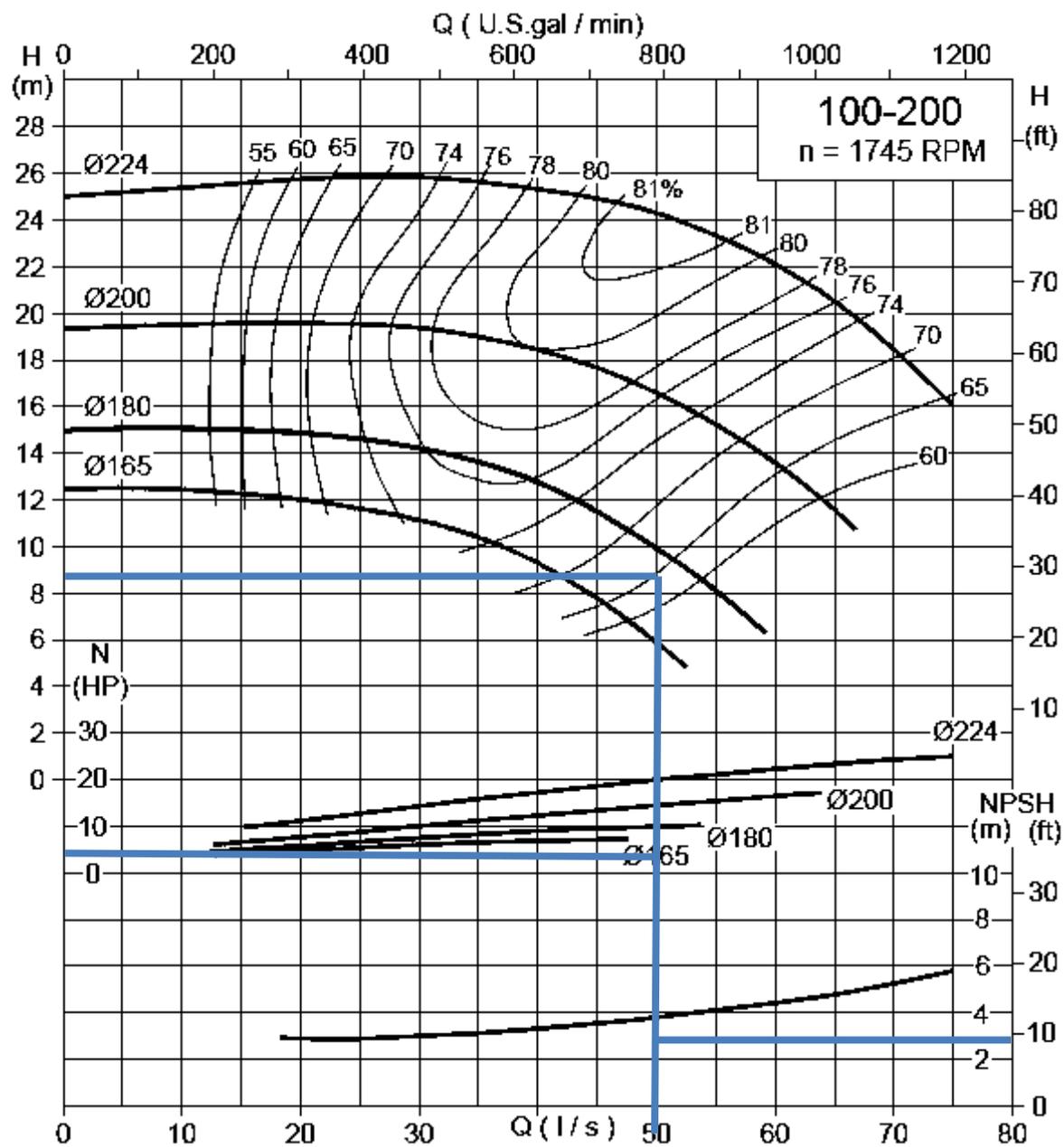


Figura 9-1. Curva de operación de la bomba.

Según la curva de operación anterior, las características con las que debo contar la bomba para el proceso a nivel industrial son las siguientes:

- Diámetro del impulsor: 180.
- Eficiencia: 67% aproximadamente.
- Potencia nominal: 10hp.
- NPSH: 4m.

El costo de la bomba se calcula por medio de la potencia de ésta, el cálculo del costo se describe con la siguiente expresión:

$$\text{Costo de bomba} = 10hp \left(\frac{10}{1.34102} \right) (\text{Horas de trabajo})(\text{Costo de kW} - h) \text{ Ecuación 9-6.}$$

El costo del kW-h para las industrias es de \$1.70/kW-h, así lo informa la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Para obtener el costo de la bomba simplemente se multiplica por el número de horas que trabajaría la bomba; suponiendo que la bomba trabaje 10 horas por día, el costo de la bomba es de \$1267.69/día.

Mediante los cálculos hechos se tendrán las características del equipo de filtración a nivel industrial para su posible instalación en la planta potabilizadora de Morelia.

X. Conclusiones y propuestas.

La principal conclusión de este proyecto es el funcionamiento del medio filtrante, conocido industrialmente como *Fieltro*, tiene la capacidad de retener prácticamente todos los sólidos que contiene la suspensión, obteniéndose un filtrado muy cristalino de alta calidad. Con lo anterior se evitará el desperdicio del agua de purga proveniente de los tanque sedimentadores de la planta potabilizadora y el azolvamiento en el río Chiquito de Morelia donde se vierte ésta, además de aprovechar nuevamente esta agua para reincorporarla al proceso de potabilización y recolectando el material arcilloso que contiene esta agua de purga para su aprovechamiento por otros sectores productivos.

El proyecto cumplió con los distintos objetivos fijados, arrojando las siguientes conclusiones:

- El filtrado se encuentra libre de sólidos suspendidos casi al 100%, las purezas se encontraron mayores al 99.8%.
- La eficiencia del *Fieltro* resultó ser muy grande, justificada por la presencia de sólidos totales en el filtrado recuperado, la cual es muy baja e imperceptible.
- La resistencia del medio filtrante es de $2.0329 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$.
- La resistencia específica de la torta es de $3.3617 \times 10^{11} \text{ m/kg}$.
- El tiempo de filtración propuesto será de 33.62 minutos.
- El flujo encontrado en la experimentación para alimentar al filtro tipo prensa es de 57.953 mL/s en promedio.
- La concentración es un factor importante para el funcionamiento del equipo de filtración, encontrándose que las concentraciones de suspensión relativamente altas contarán con mejores resultados de filtración. Se concluye con la experimentación que una concentración de 37.5 gCal/L Agua es la más idónea para la separación.

La propuesta de este proyecto es la instalación del equipo de filtración dentro de la planta potabilizadora de Morelia lo antes posible, debido a que es un gran volumen el que se vierte al río Chiquito contaminándolo además de desperdiciar este vital líquido, que debido a la explosión demográfica cada vez tendrá una mayor demanda. Con ello se ayudará de manera muy significativa al medio ambiente y solucionando algunos problemas del abastecimiento de agua tanto sociales como económicos.

XI. Referencias.

- Procesos de transporte y operaciones unitarias. Geankoplis, Christie J., 3ª edición, 1998. Editorial CECSA.
- Mass transfer operations. Treybal. Robert E., 2ª edición, 1968.
- Principios de operaciones unitarias. Foust. Alan S., 1ª edición, 1960.
- Operaciones básicas de ingeniería química. McCabe. Warren L., 1ª edición, 1956.
- Transferencia de calor y masa fundamentos y aplicaciones. Yunus A. Cengel y Afshin J. Ghajar, 4ª edición. Editorial McGraw-Hill.
- Purificación de aguas y tratamiento de aguas residuales, Fair, Geyer y Okun, 1ª edición, 1989, Editorial LIMUSA.
- Ingeniería de aguas residuales, Metcalf & Eddy, 1ª edición, 1996, Editorial McGraw-Hill.
- Tesis: Control de la contaminación de aguas y desechos líquidos, Ing. Ramiro Arredondo Mejía, 1990, U. M. S. N. H.
- Tesis: Sedimentación de alta tasa en el proceso de potabilización, Ing. Octavio Ayala Altamirano, 2003, U. M. S. N. H.
- www.inegi.gob.mx
- www.conagua.com
- www.michoacan.gob.mx
- www.cfe.gob.mx