

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**TESIS DE GRADO PREVIA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO:
INGENIERO AMBIENTAL**

**TEMA:
REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN LOS EFLUENTES LÍQUIDOS
RESIDUALES DE LA PLANTA EXTRACTORA DE
ACEITE DE PALMA AIQUISA.**

**REALIZADO POR:
JORGE ESTEBAN CORONEL ARIAS**

2004

QUITO – ECUADOR

DEDICATORIA

Dedicó la presente tesis a mis Padres,
por soportar todos los errores cometidos durante mis estudios universitarios,
y a mis hermanos pero en especial a mi hermano
Juan José.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi Padre y a mi Madre por todos los esfuerzos realizados para que pueda estudiar; por la ayuda y el apoyo desinteresado brindado para que salga adelante.

Agradezco a mis Hermanos María Cristina, Roberto y Juan José, que al igual que mis Padres, nunca me dieron la espalda y siempre me apoyaron de manera incondicional.

Agradezco a mi Abuelito por darme el ejemplo de ser una persona correcta y honesta, para que en el futuro actúe de manera correcta y principalmente honesta en todas las actividades a realizar.

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de poder estudiar y poder ser alguien en la vida.

Agradezco a la Universidad Internacional SEK y a todos los profesores que compartieron sus conocimientos con nosotros, para poder aplicar los conocimientos adquiridos, en la realización de esta tesis.

Agradezco de manera muy especial a mi Director de tesis el DOCTOR CARLOS ORDOÑEZ, más conocido con cariño por todos nosotros como “Doc”; por haber sido realmente un director y más que un director un “amigo”, ya que sin la ayuda de él no hubiera podido realizar este estudio, además agradezco la forma desinteresada de compartir sus conocimientos.

Agradezco a todos mis compañeros por todos esos momentos buenos y el apoyo en los momentos malos que compartimos durante los cinco años de carrera.

Agradezco a la Planta Extractora de aceite de palma africana AIQUISA, por confiar y darme la oportunidad de realizar la tesis.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
CAPÍTULO I	
1. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Coagulación / Floculación	4
2.1.2. Potenciales del coloide	6
2.1.3. Potencial Zeta (Z)	7
2.1.4. Cagulación por neutralización de la carga	7
2.1.5. Coagulación por compresión de la doble capa	8
2.1.6. Coagulación por puente químico	9
2.1.7. Coagulación por incorporación (o de barrido)	10
2.1.8. Coagulantes	11
2.1.9. Coagulantes y floculantes poliméricos (Poliectrolitos)	11
2.1.10. Clasificación de los polielectrolitos	12
2.1.11. Clasificación de los polímeros de acuerdo a su carga	14
2.1.12. Prueba de Jarras	15
2.2. Filtración	16
2.2.1. Teoría de la filtración	17
2.2.2. Filtración Continua	18
2.2.3. Factores de influencia en pruebas de filtración	19
2.2.4. Medios filtrantes	22
2.2.5. Equipos para filtración	25
2.3. Palma Africana	31
2.3.1. Subproductos de la industria extractora de aceite de palma africana	31

CAPÍTULO III

3. PARTE EXPERIMENTAL	32
3.1. Procedimientos y métodos de ensayo	32
3.1.1. Puntos de muestreo	32
3.1.2. Plan de Muestreo	33
3.1.2.1 Preservación de muestras	34
3.2. Métodos de Análisis	34
3.2.1. Análisis de Sólidos Totales	34
3.2.2. Análisis de Sólidos Suspendidos	35
3.2.3. Análisis de Densidad	35
3.3. Pruebas de Tratabilidad	35
3.3.1. Pruebas de Coagulación / Flocculación	36
3.3.2. Filtración	37
3.4. Datos Experimentales	38
3.4.1. Caracterización físico - química del efluente	38
3.5. Pruebas de Tratabilidad	42
3.5.1. Coagulación / Flocculación	42
3.5.2. Filtración	52
3.6. Cálculos y Resultados	55
3.6.1. Cálculo de Caudal	55
3.6.2. Cálculo de la concentración de Sólidos Totales	55
3.6.3. Cálculo de la concentración de Sólidos Suspendidos	57
3.6.4. Cálculo del porcentaje Sólidos Suspendidos	58
3.6.5. Cálculo de la densidad	59
3.6.6. Cálculo de la reducción de la carga contaminante de sólidos suspendidos	60
3.6.7. Cálculos para la selección del filtro prensa	61

3.7. Resultados	65
3.7.1. Resultados de la caracterización físico – química del efluente	65
CAPÍTULO IV	
4. DISCUSIÓN	69
CAPÍTULO V	
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
5.1. Conclusiones	73
5.2. Recomendaciones	75
CAPÍTULO VI	
6. BIBLIOGRAFÍA	76

RESUMEN

En el presente estudio se ensayaron dos métodos (coagulación / floculación y filtración) para conseguir la remoción de los sólidos suspendidos existentes en los efluentes líquidos residuales de la extractora de aceite de palma africana AIQUISA, y de este modo disminuir la carga orgánica que llega a las lagunas de oxidación, optimizando el tratamiento existente y a su vez reduciendo los valores de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), atribuidos mayoritariamente a los sólidos totales y sólidos suspendidos generados en los diferentes procesos de extracción del aceite de palma

En primer lugar, se realizó la caracterización físico - química del efluente, para posteriormente, realizar las diferentes pruebas de tratabilidad, en las cuales variando todos los parámetros posibles (pH, temperatura, concentración de químicos, tiempo de agitación, etc.) para conseguir condiciones más favorables en la remoción de los sólidos suspendidos totales, tanto en el ensayo de coagulación / floculación como de filtración.

La coagulación/floculación no es un sistema apropiado para el tratamiento de este tipo efluente, ya que no se obtuvieron resultados satisfactorios a diferencia de el sistema de filtración donde se logra una remoción del 88 % de sólidos suspendidos totales mediante el uso de un filtro prensa cuyas características operacionales están descritas en el actual trabajo, dándose además uso a la torta filtrante resultante con fines agrícolas.

DESCRIPTORES

Sólidos Totales

Sólidos Suspendidos

Demanda Bioquímica de Oxígeno

Coagulación / Floculación

Prueba de Jarras

Filtración

Filtro Prensa

ABSTRACT

In the present study two methods were tried (coagulation/flocculation and filtration) to obtain the removal of solids suspended existing in the residual water, of the extraction to the oil of African palm AIQUISA, and this way to diminish the laid-down load, that arrives at the oxidation lagoons, optimizing the existing treatment and as well reducing the values of the biochemical demand of oxygen (DBO₅), attributing mainly to total solids and suspended solids generated in the different processes from extraction of the oil of african palm.

In first place, was made the characterization physical - chemical of the residual water, for later, to make different tests from tratability, in which varying all the possible parameters (pH, temperature, concentration of chemistries, time of agitation, etc.). As much of the coagulation / flocculation test as from filtration the most favorable conditions for total suspended solids removal.

The coagulación/floculación is not an appropriate system for the treatment of this type of efluente obtain insatisfactory results, unlike the filtration system were obtained a removal of 88 % of total suspended solids by means using a filter press whose operational characteristics are described in the present work, occurring in addition use to the resulting filter cake with agricultural aims.

DESCRIPTORES

Total Solids

Suspended Solids

Biochemical Demand of Oxygen

Coagulation/Flocculation

Test of Jars

Filtration

Filter Press

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN



Fotografía 1.1.: Plantación de Palma Africana

www.fedepalma.com

La Palma Africana es originaria del Golfo de Guinea, de ahí su nombre científico, *Elaeis guineensis* Jacq., llega América con los colonizadores portugueses al Brasil y comienza a expandirse por toda América.

En el Ecuador se inicia a plantar Palma Africana (ver fotografía 1.1.) en los años de 1953 – 1954⁽¹⁾ en cultivos de pequeña escala, en Santo Domingo de los Colorados, provincia de Pichincha y Quinindé, provincia de Esmeraldas, para su posterior propagación en la zona oriental y en la mayor parte de las zonas del país con condiciones climáticas afines.

La Planta extractora AIQUISA, esta ubicada en el kilómetro tres de la vía Quinindé – Santo Domingo en el sector de San José y comienza a producir aceite rojo de palma en el año de 1984⁽²⁾ con una producción de 4.5 TRFF/hora⁽²⁾ (toneladas de racimos de fruta fresca), incrementando su producción hasta alcanzar en la actualidad una media de 9 TRFF/hora⁽²⁾.

La extracción de aceite rojo de palma africana comienza con la llegada de los racimos de fruta en camiones que son pesados en una báscula los cuales descargan la fruta en las tolvas; los camiones descargados son pesados nuevamente y se obtiene la cantidad de fruta que ha ingresado.

(1) www.ecociencia.org

(2) Base de datos AIQUISA

La fruta es descargada de las tolvas a las vagonetas en donde se los transporta a los autoclaves en base a vapor de agua presurizado para su cocción y esterilización de la fruta en donde permanece un promedio de 90 minutos.

Las vagonetas con la fruta esterilizada una a una son elevadas por una grúa monorriel que va depositando en el desfrutador el cual es un tambor giratorio donde se separa el raquis de los racimos de fruta en un proceso que a base de golpes de los racimos contra los barrotes que posee en su interior el tambor, el raquis pasa a una banda sin fin llegando a los calderos donde sirven como combustible para producir vapor de agua que es utilizado en los autoclaves; el exceso de raquis es incinerado.

En la digestión la fruta entra a unos cilindros verticales provistos de unas paletas giratorias, los cuales son llamados digestores, en este proceso también se inyecta vapor, con el fin de macerar la fruta, obteniendo así una cierta cantidad de aceite.

La fruta pasa al proceso de prensado donde se extrae el aceite rojo de palma africana por medio de las prensas, que son unos tornillos sin fin los cuales trabajan a altas presiones; el aceite extraído no está puro, necesitando de otro proceso.

La clarificación consiste en separar el aceite, el agua y los sólidos por diferencia de densidades en los tanques clarificadores; como este proceso no es lo suficientemente eficiente se centrifuga para obtener a un aceite más puro.

El aceite clarificado es almacenado en tanques para su posterior comercialización a las diferentes industrias en donde lo procesan para quitarle el color, además de añadirle preservantes y finalmente envasarlo.

El agua y los sólidos residuales del proceso de centrifugación son transportados por unas canaletas a los tanques florentinos para la recuperación del aceite remanente el cual por su baja calidad es comercializado a la industria jabonera.

Los sólidos, principalmente por su tamaño y por otras características corresponden a los sólidos suspendidos que se encuentran en el agua residual. Estos sólidos básicamente de

cáncer orgánico, son los responsables de los altos valores de la Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) que presentan los efluentes líquidos y, constituyen el principal problema ambiental de la Industria de extracción de aceite de palma.

Debido a que el efluente líquido posee una gran cantidad de sólidos suspendidos se lo denomina lodo, el cual está constituido por residuos de fibras, partículas finas de tierra, o de fragmentos de la cáscara de la nuez, que finalmente se los trata de separar del agua en el desarenador.

El agua que ha pasado por los tanques florentinos y el desarenador es bombeada a las lagunas de oxidación en donde por procesos biológicos se degrada la materia orgánica (sólidos suspendidos) y el aceite que ya no se ha podido recuperar.

El sistema convencional de tratamiento de las aguas residuales (lagunas de oxidación), no contempla una remoción preliminar de los sólidos suspendidos lo que significaría una reducción considerable de la carga orgánica hacia las lagunas de oxidación que, en el momento actual conservan gran cantidad de sólidos hasta las últimas etapas del tratamiento.

Debido a la falta de un proceso preliminar como el de coagulación / floculación o el de filtración en la planta extractora de palma AIQUISA, se están descargando en los efluentes líquidos grandes cantidades de materia orgánica provenientes de los procesos de esterilización, digestión de la fruta y la mayor parte en el prensado, causando así un problema ambiental que se lo puede mitigar con la implementación de un sistema de remoción de sólidos suspendidos.

El objetivo principal de este estudio es la remoción de los sólidos suspendidos en los efluentes líquidos de la extractora de palma AIQUISA, para esto se necesita conocer las características físico – químicas del efluente, realizando mediciones in situ como temperatura, pH y caudal; para posteriormente realizar análisis de sólidos totales y sólidos suspendidos en el laboratorio de la Universidad Internacional SEK y en el laboratorio de la planta; además de varias pruebas de tratabilidad de coagulación/floculación y de filtración.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Coagulación / Flocculación

Se llama coagulación/floculación al proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con peso específico superior al del agua llamadas floc. Dicho proceso se usa para:

- a) Remoción de turbiedad orgánica o inorgánica que no puede sedimentar rápidamente.
- b) Remoción de color verdadero y aparente.
- c) Eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación.
- d) Destrucción de algas y plancton en general.
- e) Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados químicos suspendidos o compuestos orgánicos en otros.

El uso de cualquier otro proceso, como la sedimentación simple, para la remoción de partículas muy finas, resulta antieconómico, sino es imposible.

Hay que distinguir dos aspectos fundamentales en la coagulación/floculación del agua:

- a) La desestabilización de las partículas suspendidas, es decir la remoción de las fuerzas que las mantiene separadas.
- b) El transporte de ellas dentro del líquido para que hagan contacto, generalmente estableciendo puentes entre si y formando una malla tridimensional de coagulos porosos.

1. Coagulación comienza en el mismo instante en que se agregan los coagulantes al agua y dura solamente fracciones de segundo. Básicamente consiste en una serie de reacciones físicas y químicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma.

2. Flocculación es el fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas chocan unas a otras para formar coagulos mayores.

Tres mecanismos pueden actuar en el primer fenómeno: El de adsorción – desestabilización basado en las fuerzas electostaticas de atracción y repulsión, el del puente químico que establece una relación de dependencia entre las fuerzas químicas y la superficie de los coloides, y el de sobre saturación de la concentración de coagulantes en el agua.

En el segundo aspecto debe distinguirse entre: flocculación ortocinética y pericinética, o con escala de turbulencia por encima o por debajo de la microescala de Kolmogoroff.

La primera es la inducida por la energía comunicada al líquido por fuerzas externas (paletas giratorias, por ej.). La segunda es la promovida, internamente dentro del líquido, por el movimiento de agitación que en las partículas tiene dentro de aquel (movimiento browniano), que se realiza en un tiempo muy corto después de desestabilizada la partícula hasta que la partícula tiene un tamaño que se acerca a la microescala de Kolmogoroff. En las plantas de tratamiento de flocculación es tanto pericinética como ortocinética, resumiendo lo anterior (tabla 2.1):

1. Desestabilización de partículas (coagulación)	Adsorción - neutralización	
	Puente químico	
	Sobresaturación	
2. Transporte de partículas (flocculación)	Ortocinético (>n)	Creado en el líquido por el gradiente de velocidad
	Pericinético (<n)	Por movimiento browniano
		Por sedimentación

Tabla 2.1.: Coagulación / Flocculación

Valencia, J. 3era edición (2000). Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Tomo I y II. Bogota-Colombia: McGraw-Hill.

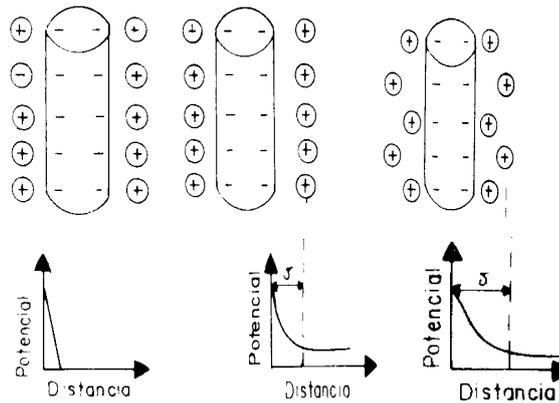


Figura 2.1.: Mecanismos de Adsorción - Neutralización

Valencia, J. 3era edición (2000). Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Tomo I y II. Bogota-Colombia: McGraw-Hill.

Las fuerzas electrostáticas existentes en las partículas, rodean a estas de una doble capa eléctrica que interacciona con la fase acuosa. Para explicar este concepto, se han presentado, sucesivamente, tres teorías:

- a) La primera supone que acudirán a la superficie del coloide, tanto iones positivos del medio dispersante cuantos sean necesarios para dispersar su carga (ver figura 2.1.). Se formará una capa adherida alrededor de él, en la que caerá todo el potencial q . Esta teoría fue inicialmente propuesta Helmotz en 1879 y analizada por Nerst diez años más tarde.
- b) Gouy 1910 y Chapman en 1913 demostraron que la teoría de Helmotz-Nerst, no era adecuada pues la agitación térmica del líquido tiende a separarlos contraiónes de la superficie del coloide y van ha formar una capa difusa alrededor de ella en la que el potencial cae lentamente prolongandose hasta una distancia δ dentro del líquido que la rodea (ver figura 2.1.)
- c) En 1924, Stern mostró que era necesario aceptar la posibilidad de la coexistencia de las teorías de Helmotz y las de Gouy, considerando la formación de una capa adherida y una capa difusa alrededor del coloide (ver figura 2.1.)

2.1.2. Potenciales del coloide

En un coloide se deben tener en cuenta, los siguientes potenciales:

1. El potencial q que existe en la superficie del coloide, o potencial Nernst.

2. El potencial ϕ que existe en la superficie interior de la doble capa, donde empieza la parte difusa.
3. El potencial Z que existe en el plano de cizalla.

El plano de cizalla es el que separa del resto de la dispersión, la sección de la capa que se mueve con la partícula formando parte integral de ella; y está situado en algún punto, entre la superficie interior y la superficie exterior de la doble capa.

Como no se puede separar el coloide de los contraiones que lo rodean, el único potencial que se puede determinar con más o menos precisión es el potencial Z o sea el potencial de la superficie del plano de cizalla.

2.1.3. Potencial Zeta (Z)

La teoría de la doble capa no está aún totalmente completa. La simplificación hecha por Helmholtz en 1879 da, sin embargo, una mayor comprensión del fenómeno.

Helmholtz asimila la doble capa a un condensador de dos cargas iguales y opuestas, separadas por el espesor. Si las cargas son iguales a q el potencial de dicho condensador es el potencial zeta, Z . De acuerdo con la electrostática este potencial varía con la constante dieléctrica D_c y bien expresado por la fórmula:

Ecuación 2.1.3.1.

$$Z = 4\pi q \delta / D_c$$

De donde:

$$q \delta = Z D_c / 4\pi$$

Valencia, J. 3era edición (2000). Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Tomo I y II. Bogotá-Colombia: McGraw-Hill.

El producto $q\delta$, es decir la carga de la partícula por la distancia hasta la cual se le considera efectiva, es llamado el momento eléctrico del coloide, y ha sido determinado experimentalmente partiendo del valor de la constante eléctrica.

2.1.4. Coagulación por neutralización de la carga

La neutralización de las cargas de coloides liofóbicos, puede hacerse según Mackrle:

- a) Por cambio de la concentración de los iones que determinan el potencial del coloide.

- b) Por la absorción de iones que posean una carga opuesta a la de los iones determinantes del potencial, y que sean capaces de remplazar a estos en la capa de Stern.

Los coloides pueden absorber (ver figura 2.2.):

- a) Iones o productos de hidrólisis simples como el hidróxido de aluminio o el hidróxido de hierro con pesos moleculares entre 44 y 135 que se forman al inicio de la coagulación.
- b) Polímeros formados poco más tarde, al continuar las reacciones hidrolíticas del coagulante con la alcalinidad y con el agua misma. Estas moléculas alcanzan pesos entre 256 (hidróxido de aluminio) y 1430 (hidróxido de hierro)

2.1.5. Coagulación por compresión de la doble capa

Incrementando la concentración del electrolito se incorporan contra iones en la capa difusa, con la cual esta se represa y se disminuye la magnitud de las fuerzas repulsivas, permitiendo la eliminación de la barrera de energía, por eso, la adición de una sal neutra no cambia el potencial del coloide pero altera la forma de la curva de las fuerzas coulombicas, disminuyendo la distancia hasta la cual son efectivas.

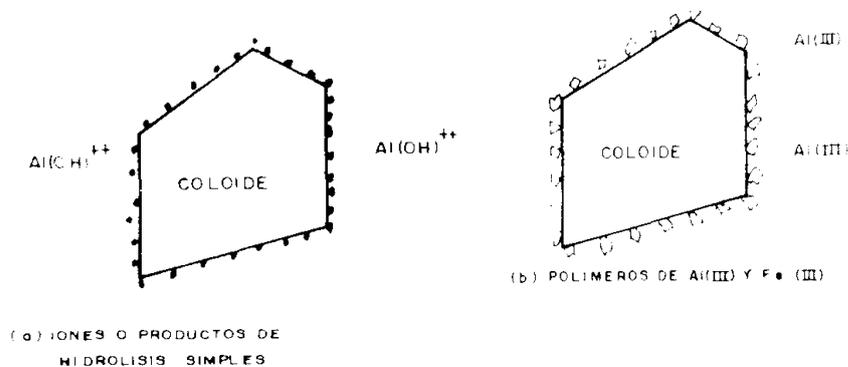


Figura 2.2.: Adsorción de contraiones en la partícula coloidal

La reducción del espesor de la doble capa, sin embargo, es más importante que la reducción del potencial Zeta, hasta el punto isoelectrico ($Z = 0$)

La adsorción de contra iones puede ser un fenómeno electrostático o químico. Si el fenómeno es puramente electrostático, y lo que se agrega son contra iones, en la capa difusa, los iones más pequeños podrán acercarse más a la superficie de la partícula y no se fijarán a puntos de absorción determinados, sino que flotarán libremente a su alrededor en este caso:

- a) La coagulación se produce cuando el potencial Zeta se hace cero.
- b) El exceso de coagulantes agregados no puede producir estabilización de la suspensión, pues los coloides no pueden adsorber más contra iones de los que su carga primaria lo permite.
- c) Entre mayor sea la carga del contra ión más disminuirá la carga del coloide.

Esto se debe que mientras más fuerte sea la carga eléctrica del contra ión, más rápidamente neutraliza la partícula. Ahora bien, como los productos de la hidrólisis del Al(III) y el Fe(III) tienen cargas que van desde +5 hasta -1, la cantidad de coagulante que debe ser agregado a una suspensión dependerá más de la carga de los productos de hidrólisis que se formen que del número de partículas que de la suspensión.

2.1.6. Coagulación por puente químico

Si la adsorción de contraiones es debida a fuerzas químicas se establecerán enlaces de hidrógeno, covalentes, iónicos, etc. Entre las moléculas adsorbidas y las superficies de los coloides, en cuyo caso estas quedarán adheridas a puntos fijos de adsorción y su número podrá aumentar hasta cambiar la carga del coloide (de negativo a positivo) con lo que se producirá su estabilización. Por otra parte, entre más puntos de adsorción disponibles haya (más superficie que cubrir) más moléculas capaces de ser adsorbidas (coagulantes) hay que agregar y serán más fácilmente adsorbidos los polímeros grandes que los pequeños.

Esto explica porque no siempre la coagulación se realiza a $Z = 0$ y puede incluso no producirse, si las dosis son muy altas: debido a que en lugar de adsorción electrostática se ha producido adsorción química.

Las moléculas poliméricas de alto peso molecular pueden ser adsorbidas químicamente en las partículas coloidales (ver figura 2.3.).

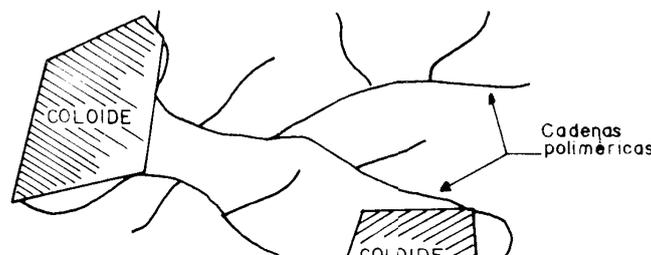


Figura 2.3.: Adsorción de polímeros en una partícula de caolinita

Valencia, J. 3era edición (2000). Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Tomo I y II. Bogotá-Colombia: McGraw-Hill.

En este caso la coagulación no está mayormente influenciada por las fuerzas electrostáticas, sino por el fenómeno coloidal en uno o más puntos fijos de adsorción, dejando el resto de la cadena libre, de forma que pueda flotar en el líquido y adherirse a otro coloidal. Se forma así un puente molecular que une una partícula con otra. La repetición de este fenómeno entre diversas partículas es lo que permite la aglutinación de ellas en masas llamadas floc.

Clase	Modo	Tipo de adsorción
1. Adsorción - desestabilización	Neutralización de la carga Comprensión del doble lecho	Adsorción electrostática Adsorción química
2. Puente químico	Unión de partículas por medio de cadenas poliméricas	Adsorción química
3. Incorporación	Producción de precipitado químico	No hay

Tabla: 2.2.: Clases de Coagulación

Valencia, J. 3era edición (2000). Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Tomo I y II. Bogotá-Colombia: McGraw-Hill.

Cuando la coagulación es pobre o no se produce cuando se pone un exceso de polímeros. Pues en este caso, todos los sitios de adsorción pueden quedar cubiertos, lo que reestabiliza las partículas sin que tal cosa signifique reinversión del potencial Z.

Por otra parte, dentro de determinadas condiciones, una suspensión desestabilizada puede estabilizarse de nuevo si es sometida a una agitación violenta, puesto que las partículas llegan a quedar totalmente cubiertas por el polímero, al doblarse las cadenas poliméricas sobre sí mismas y ocupar otros sitios en el mismo coloidal al cual se han adherido.

2.1.7. Coagulación por incorporación (o de barrido)

La coagulación por incorporación se produce cuando se agrega una concentración de coagulantes tan alta, que se excede el límite de solubilidad de ese compuesto en el agua. En ese momento se precipitan los hidróxidos que se forman por reacción de la alcalinidad y el agua misma con los coagulantes, con lo que induce la producción de una masa esponjosa (floc de barrido) que atrapa en su caída a los coloides y partículas

suspendidas las cuales se ven forzadas a decantar, incorporadas dentro del precipitado que desciende.

Este tipo de remoción de turbiedad, no es una verdadera coagulación, pero es la que más frecuentemente se produce, debido a que en la práctica, las dosis que se usan están por encima del límite de solubilidad de los hidróxidos de aluminio o hierro en el agua, a los pH y temperaturas normales de trabajo.

La coagulación por incorporación no excluye, sin embargo, la posibilidad de que simultáneamente se produzca también, es parte o en etapa inicial, coagulación por puente químico, e incluso coagulación por adsorción-neutralización. La coagulación corriente, pues, se realiza por medio de diferentes mecanismos que se sobreponen y complementan.

Para poder conocer que tipo de coagulación se produce, suelen utilizarse los llamados diagramas de coagulación.

2.1.8. Coagulantes ^(*)

Los coagulantes los podemos clasificar en dos grupos: Los polielectrolitos o ayudantes de coagulación y los coagulantes metálicos.

Ambos grupos básicamente actúan como polímeros además de la carga eléctrica que poseen.

En los polímeros, las cadenas poliméricas están ya formadas cuando se los agrega al agua. En los segundos, la polimerización se inicia cuando se pone el coagulante en el agua, después de lo cual viene la etapa de adsorción por los coloides presentes en la fase acuosa.

Es, sin embargo, necesario observar que la velocidad de sedimentación de las partículas coaguladas no dependen en forma exclusiva de los coagulantes usados sino del peso de las partículas que se trata de sedimentar.

(*) www.sedapal.com

2.1.9. Coagulantes y floculantes poliméricos (Poliectrolitos)

Un polímero puede definirse como sustancia formada por una cantidad de unidades básicas, llamadas *monómeros*, unidades por enlaces covalentes que se repiten sucesivamente. Su grado de polimerización está dado por el número de monómeros que conforman su cadena polimérica.

El tipo de polímeros que se formen depende de la naturaleza de los grupos funcionales que lo integran. Todos los monómeros capaces de formar polímeros deben tener por lo menos dos núcleos activos para que la macromolécula formada pueda conservar su configuración inicial. Cuando las cadenas poliméricas tienen múltiples grupos funcionales activos se denominan **polipectrolitos**. Los que se usan en plantas de tratamiento son compuestos de alto peso molecular (10^4 a 10^7) que se aplican en pequeñas concentraciones (0.01 a 1.0mg/L) lo que compensa parcialmente su alto precio.

La razón para usar bajas dosis está es la cantidad tan enorme de segmentos que ellos poseen. La poliacrilamida, con un peso molecular de 5.5×10^6 g/mol, produce 10^{13} segmentos por litro de agua con una dosis de 0.1mg/L.

De la investigación realizada sobre este tipo de sustancias, se desprenden las siguientes conclusiones prácticas, entre otras:

1. Los polipectrolitos usados en unión de coagulantes metálicos comunes, se producen un floc que sedimenta rápidamente.
2. Con ciertas aguas, la dosificación de polipectrolitos en pequeñas cantidad reduce el gasto de coagulante.
3. Las algas son rápidamente coaguladas con polipectrolitos catiónicos.
4. Todos los polipectrolitos no igualmente efectivos con todas las aguas.
5. Dosis excesivas de polipectrolitos producen dispersión en lugar de ayudar a la coagulación.
6. Deben los polipectrolitos añadirse en forma de solución diluida para asegurar una completa mezcla.

2.1.10. Clasificación de los polipectrolitos

Los polipectrolitos de importancia en el tratamiento de agua pueden clasificarse así:

Según su origen	Según su carga	
Polímeros Naturales	Iónicos	Catiónicos
		Aniónicos
Polímeros Sintéticos	No iónicos	

Tabla 2.3.: Clasificación de los polielectrolitos

Valencia, J. 3era edición (2000). Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Tomo I y II. Bogota-Colombia: McGraw-Hill.

a) Polímeros naturales

Son los que se producen en las reacciones bioquímicas naturales de animales y plantas, tales como proteínas, carbohidratos y polisacáridos (almidón, glucosidos).

Muchos de estos componentes tienen propiedades coagulantes o floculantes y son usados por los nativos en forma empírica para clarificar el agua, como pasa con la penca de la tuna o nopal o con las semillas del nirmalí.

Los que han dado mejor rendimiento y vale la pena considerarlos para su uso en plantas de tratamiento son: los compuestos algínicos, los derivados de la tuna o nopal y los almidones.

Los componentes algínicos (alginato de sodio, ácido algínico) son obtenidos de algas marinas (algas pardas), los cuales contienen polisacáridos ampliamente utilizados en la industria, especialmente en productos farmacéuticos, alimenticios, textiles. Por eso, su empleo como coagulante o floculante consumiría solamente una fracción de subproducción total. Su eficiencia a este respecto, ha sido comprobada repetidas veces por varios investigadores.

Los derivados de la tuna o nopal son polvos blancos solubles en agua que se extraen con relativa facilidad. Han sido probados con agua turbia artificial y natural y han dado resultados comparables o mejores que los de los polímeros sintéticos. Su producción no ha sido hecha en escala industrial hasta el momento.

Los almidones presentan una amplia gama de posibilidades. Su problema consiste en producir a partir de ellos compuestos solubles en agua. Algunas marcas comerciales de polielectrolitos son simples derivados de almidones. Una de las ventajas de los

polielectrolitos naturales es su baja toxicidad pues en muchos casos son empleados como alimentos o aditivos alimenticios.

b) Polímeros sintéticos

Son compuestos orgánicos producidos por medio de la transformación química de derivados del carbón y del petróleo. Incluye la mayoría de los polímeros manufacturados por la industria y de mayor venta comercial. Muchos, aunque no todos, se encuentran en forma de polvo seco. Otros son líquidos con concentraciones del 10% al 60 % de polímeros activos.

Se considera que el 90% de ellos tienen como monómero básico la acrilamida:

La poliacrilamida es típicamente un polímero no iónico que puede manejarse en forma muy variada. Esto tiene la ventaja de que permite sintetizar una gran variedad de compuestos, con distintas propiedades y aplicaciones.

Uno de los más antiguos polielectrolitos sintéticos usados es la sílica activada, que se prepara haciendo reaccionar una solución diluida silicato de sodio Na_2SiO_3 con cualquiera de los siguientes compuestos: ácido sulfúrico o silicato de sodio, solución de sulfato de aluminio, sulfato de amonio, cloro, bicarbonato de sodio, o bióxido de carbono. Estos compuestos se denominan agentes activadores y son los que promueven la polimerización del Na_2SiO_3 . La extensión de este proceso depende del porcentaje de neutralización del silicato de sodio y se incrementa con el tiempo. Si se deja que se complete, se forma un gel o pasta que puede tapar los conductos en el sistema de dosificación, lo que crea serios problemas operativos. Este es el motivo por el cual este polímero no se usa hoy en día.

En la actualidad existen más de 100 marcas comerciales de polielectrolitos sintéticos aprobados para su uso en agua potable. Pero hay muchos más cuya toxicidad es alta, debido a que se producen con monómeros que pueden causar serios daños a la salud y no deben por eso utilizarse nunca en plantas de tratamiento de agua.

2.1.11. Clasificación de los polímeros de acuerdo a su carga

Un polímero puede tener o no carga eléctrica. Los que no la tienen se llaman no iónicos, los que la tienen pueden ser catiónicos (carga positiva) o aniónicos (carga negativa) y, debido a la multiplicidad de grupos iónicos presentes en las cadenas poliméricas, reciben el nombre genérico de polielectrolitos.

Los derivados de la poliacrilamida son no iónicos y los de la poliacrilamida hidrolizada son aniónicos.

Los compuestos catiónicos son usualmente derivados de amonio cuaternario o de imina de polietileno, (ver figura 2.4.) a continuación algunos ejemplos:

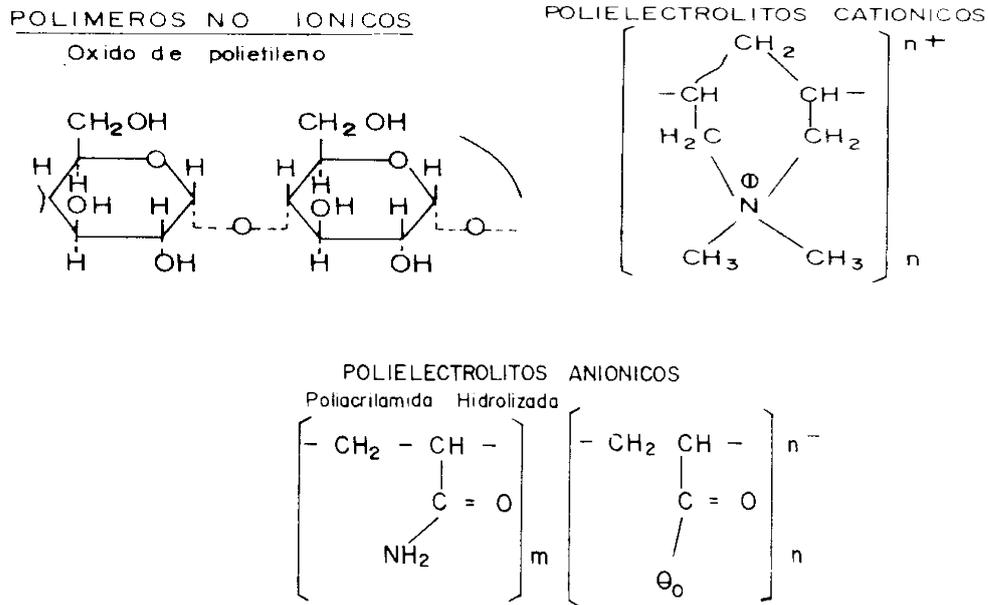


Figura 2.4.: Ejemplos de polielectrolitos

Valencia, J. 3era edición (2000). Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Tomo I y II. Bogota-Colombia: McGraw-Hill.

2.1.12. Prueba de Jarras



Fotografía 2.1.: Equipo para la “Prueba de Jarras”

Las pruebas mas representativas para determinar el comportamiento de los coagulantes y floculantes a escala pequeña es el ensayo de la “Prueba de Jarra” (ver fotografía 2.1).

Es un método de simulación de los procesos de Coagulación y floculación, realizado a nivel de laboratorio que permite obtener agua de buena calidad, fácilmente separable por decantación; los flóculos formados con diferentes dosis del coagulante dan como resultado valores de turbiedad diferentes.

Determinar las variables físicas y químicas de los procesos de coagulación; floculación y sedimentación; tales como:

- a) Selección del coagulante
- b) Selección del pH óptimo
- c) Gradientes y tiempos de mezcla rápida
- d) Determinación de las velocidades de sedimentación
- e) Eficiencia de remoción.

2.2. Filtración

La filtración es la separación de una mezcla de sólidos y fluidos que incluyen el paso de la mayor parte del fluido a través de un medio poroso, que retiene la mayor parte de las

partículas sólidas contenidas en la mezcla. “**Filtración** es el nombre de la operación unitaria. Un filtro es un equipo de las operaciones unitarias por medio del cual se realiza la filtración. El medio filtrante es la barrera que permite que pase el líquido mientras retiene la mayor parte de los sólidos. Dicho medio puede ser una pantalla, una tela, papel o un lecho de sólidos. El líquido que pasa a través del medio filtrante se conoce como filtrado”.

Perry, R y Green, D. 7ma edición (2001). Manual del Ingeniero Químico. Vol III. Madrid-España: McGraw-Hill

La filtración y los filtros se pueden clasificar de varias formas:

1. *Por la fuerza impulsora.* El flujo de filtrado es inducido por el medio filtrante mediante la carga hidrostática (gravedad), presión aplicada corriente arriba del medio filtrante, vacío o presión reducida aplicada corriente abajo del citado medio o fuerza centrífuga aplicada al medio. La filtración centrífuga se asocia a la sedimentación centrífuga.
2. *Por el mecanismo de filtración.* Aunque el mecanismo para la separación y acumulación suelen considerar dos modelos y constituyen la base para la aplicación de la teoría al proceso de filtración. Cuando los sólidos quedan retenidos en la superficie de un medio de filtración y se amontonan uno sobre otros para formar una torta de espesor creciente, la separación es conocida como **filtración de torta**. Cuando los sólidos quedan atrapados dentro de los poros o cuerpo del medio de filtración, se le denomina **medio filtrante de profundidad o filtración con clarificación**.
3. *Por el objetivo.* La meta de proceso de filtración puede ser la obtención de sólidos secos, líquido clarificado o ambas cosas. La recuperación de sólidos se obtiene mejor mediante la filtración de la torta, mientras que la clarificación del líquido se logra ya sea por la filtración en profundidad o de torta.
4. *Por el ciclo operacional.* La filtración puede ser intermitente (por cargas) o continuo. Los filtros del modo intermitente, a velocidad constante o en ciclos variables con respecto a ambas magnitudes. Los ciclos en la filtración intermitente pueden variar en manera considerable dependiendo del área de filtro y de la carga de sólidos.
5. *Por la naturaleza de los sólidos.* La filtración de torta puede incluir una acumulación de sólidos que pueden ser compresible o no serlo. El tamaño de

partícula puede ser del mismo orden de magnitud que el tamaño mínimo de poro de la mayoría de los filtros (1 a 10 μm . y mayor), o puede ser menor (1 μm por debajo del tamaño de bacterias e incluso de moléculas grandes). En la mayoría de las filtraciones se dan sólidos del primer rango del tamaño; los del último rango pueden ser filtrados solo por filtración de medio de filtro o por ultrafiltración, a menos que sean convertidos al primer rango de tamaño por agregación.

Estos métodos de clasificación no se excluyen mutuamente. Así, los filtros se dividen normalmente primero en los dos grupos de equipos de torta y clarificación, después en grupos de equipos que usan el mismo tipo de fuerza impulsora y posteriormente por cargas y continua.

2.2.1. Teoría de la filtración

Aunque mediante investigación se ha desarrollado una detallada teoría, es todavía difícil definir un sistema líquido-sólido dado y es más rápido, a la vez que seguro, el determinar las condiciones para los filtros mediante experiencias realizadas a pequeña escala. Sin embargo, la teoría de filtración permite la correlación de los datos experimentales y extrapolarlos cuando es necesario para una escala mayor.

En la filtración de torta o superficial hay dos áreas principales a considerar: la filtración continua, en la que la resistencia del filtro de torta (sólidos de proceso depositados) es muy grande con respecto a la resistencia del medio filtrante y del líquido de drenaje, y la filtración a presión por cargas están, generalmente, provistos de una tela pesada, y tensa además de una capa de recubrimiento, lo que representa una resistencia significativa, que debe ser tomada en cuenta. Los filtros de filtración continua usan telas poco tupidas que ofrecen poca resistencia con lo que ofrecen los filtros de torta.

La teoría simplificada para ambas modalidades de filtración (continua y por cargas) se basan en la ecuación de Hagen-Poiseuille:

Ecuación 2.2.1.1.

$$\frac{1}{\mu} \frac{dV}{Ad\Theta} = P / (\alpha\omega V/A + r)$$

Perry, R y Green, D. 7ma edición (2001). Manual del Ingeniero Químico. Vol III. Madrid-España: McGraw-Hill

2.2.2. Filtración Continua

Dado que la experimentación y el escalado son diferentes para las filtraciones por cargas y continua.

Es conveniente y razonable asumir para la filtración continua (excepto si tiene filtros con recubrimiento) que la resistencia de la tela de filtro junto con la del líquido del drenaje es insignificante comparada a la resistencia del filtro de torta y que además la caída de presión y la resistencia específica de la torta permanecen constantes a lo largo del ciclo de filtración. La Ecuación integrada bajo estas condiciones, permite obtener las siguientes relaciones:

Ecuación 2.2.2.1

$$W = \sqrt{2\omega P \Theta_f / \mu(\alpha\omega V/A + r)}$$

$$V_f = \sqrt{2P \Theta_f / \mu \alpha \omega}$$

$$\Theta_\omega = W V_w \mu \alpha / P_\omega$$

$$\Theta_\omega = \alpha N W^2$$

$$\Theta_w / \Theta_f = 2 V_w / V_f$$

Donde:

W es el peso de los sólidos del filtro de torta seca por unida de área.

V_f es el volumen filtrado por formación de la torta por unidad de área.

V_ω es el volumen de filtrado por el lavado de la torta por unidad de área

Θ_f es el tiempo de formación de la torta.

Θ_ω es el tiempo de lavado de la torta

N es la razón de lavado, el volumen de lavado de torta/por el volumen de líquido en la descarga de la torta.

En tanto que la concentración de sólidos suspendidos en la alimentación permanece constante, estas ecuaciones conducen a las siguientes correlaciones:

$$\log W \text{ vs. } \log \Theta_f$$

$$\log V_f \text{ vs. } \log \Theta_f$$

$$\Theta_\omega \text{ vs. } W V_\omega$$

$$\Theta_\omega \text{ vs. } N W^2$$

$$\Theta_\omega / \Theta_f \text{ vs. } V_\omega / V_f$$

Hay otras dos correlaciones empíricas:

$$W \text{ vs. espesor de la torta}$$

$$\log R \text{ vs. } N$$

Donde:

R es el porcentaje remanente, el porcentaje de soluto de soluto en la torta antes de lavar que permanece después del lavado.

2.2.3. Factores de influencia en pruebas de filtración

Vacío o presión. La inmensa mayoría de los filtros continuos usan vacío para obtener la fuerza impulsora para la filtración. Sin embargo, si la suspensión de alimentación contiene una fase líquida altamente volátil, o si esta caliente, saturada y cerca del punto de ebullición a presión atmosférica, puede ser necesaria la presión para obtener la fuerza impulsora.

La filtración a presión podría usarse también cuando el contenido requerido en humedad de la torta es mas bajo que el que se obtendría al vacío. El objetivo de la mayoría de los filtros continuos es producir una torta seca o manejable. La mayoría de los filtros al vacío descargan fácilmente una torta seca y consolidada cuando operan en ambiente abierto o semiabierto.

Si en cualquier momento el filtro debe funcionar bajo presión o dentro de un recinto a vapor, por la necesidad de una mayor fuerza impulsora o debido a la presión de vapor de la fase líquida, la descarga de una torta seca se dificulta. El problema de sacar una torta seca de un recinto presurizado ha excluido el uso de filtros continuos a presión en los casos en los que esto es un requerimiento. La operación en las que la torta seca deben sacarse de un recinto cerrado se restringe a tortas relativamente secas y desmenuzables que puedan fluir a través de válvulas que forman el cierre de vapor.

Descarga de la torta filtrante. Para que una operación de filtrado sea practica, debe ser posible producir una torta suficientemente espesa para descargarla. En pruebas a pequeña escala se decide previamente que tipo de mecanismo de descarga es aplicable.

Temperatura de la suspensión de alimentación. La temperatura puede ser tanto una ayuda como una limitación. Cuando se incrementa la temperatura de la suspensión de la alimentación, la viscosidad de la fase líquida decrece, causando un aumento de la

velocidad de filtración y una disminución en el contenido de humedad de la torta. El límite de los beneficios de aumentar la temperatura ocurre cuando la presión de vapor de la fase líquida empieza a reducir el vacío permitido. Si la fase líquida puede evaporarse súbitamente en el interior del filtro, se producen resultados indeseables como la interrupción de la formación de la torta adyacente al medio filtrante de posición de escamas en los poros del filtro, un rápido aumento en la caída de presión en el interior del filtro debido al incremento de flujo de vapor o una disminución de la capacidad de vacío de la bomba. En la mayoría de los casos, el sistema de vacío debe ser diseñado de tal forma que la fase líquida no hierva. En algunos casos especiales se puede usar la filtración a vapor para aprovechar las ventajas de la temperatura sin tener que calentar la suspensión de alimentación. Si es posible puede hacerse pasar vapor seco a través de la torta de mezcla para aumentar la temperatura de la humedad residual, reducir la viscosidad y bajar su contenido.

Control del espesor de la torta. A veces la velocidad de formación de la torta es lo suficientemente rápida para crear una torta demasiado espesa para las operaciones posteriores.

- a) El espesor de la torta debe controlarse con la reducción del nivel de la suspensión alimentada.
- b) El espesor de la carga se restringe frecuentemente cuando el lavado de la torta es necesario.

Cuando el contenido mínimo de humedad de la torta es el factor controlante, el espesor de la torta no es importante, aunque el mínimo requerido para la descarga es a veces controlante.

Ciclo de filtración. Cada ciclo de filtración se compone de la formación de la torta y de una más de las operaciones siguientes:

- a) Deshidratación
- b) lavado
- c) secado térmico
- d) secado a vapor
- e) descarga de la torta.

Taponamiento de la tela de filtro. Los filtros de filtración continua, excepto los que tienen recubrimiento, usan diferentes medios para la separación de las fases sólida y líquida del filtrado. Dado que el medio filtrante está en contacto con los sólidos de proceso, hay siempre un peligro, y es casi inevitable el taponamiento de la tela o medio filtrante.

El taponamiento del material en sí mismo, tanto por la ocupación de los poros por los sólidos de proceso como por los sólidos precipitados en y alrededor de las fibras que componen el medio filtrante. El medio filtrante elegido debe tener la luz máxima posible que permita mantener la claridad de filtrado requerida. Aquellos materiales que produzcan un filtrado claro y que no tengan una rápida tendencia a obstruirse son generalmente, ligeros de peso y no duran tanto como otros más gruesos, materiales menos tupidos. Cuando se quiere que el filtro siga una etapa de espesamiento por gravedad o de clarificación, es aconsejable recircular el líquido de filtrado al espesador o clarificador. Raramente se obtiene con un filtro continuo de tela un filtrado totalmente claro. Los poros del medio filtrante son más grandes que algunos de los sólidos de la suspensión, por lo que estos pasaran a través del medio filtrante. Una vez que los poros del medio filtrante se han bloqueado los sólidos mismos forman un entramado para las partículas que quedan clarificándose el líquido del filtrado.

Filtración por cargas. Como la mayoría de los filtros por cargas trabajan bajo presión más que a vacío,

1. *Filtración a presión constante.* El mecanismo que actúa en un gas comprimido mantenido a presión constante.
2. *Filtración a velocidad constante.* Se emplean diferentes tipos de bombas de desplazamiento positivo.
3. *Filtración a presión y a velocidad variables.* El uso de una bomba centrífuga disminuye con el aumento de la contrapresión.

2.2.4. Medios filtrantes

Todos los filtros requieren de un medio filtrante para la retención de sólidos. La especificación de un medio de filtración está basada en la retención de un tamaño mínimo de partícula y una buena eficiencia en la eliminación por separación, así como también una aceptable duración.

La elección del medio de filtración es, con frecuencia, la consideración más importante para asegurar el funcionamiento satisfactorio de un filtro. Para la filtración de la torta, la selección del medio filtrante incluye la optimización de los siguientes factores:

1. Capacidad de detener los sólidos sobre sus poros con rapidez, después de que se inicie la alimentación (propensión mínima a ser purgados).
2. Baja velocidad de arrastre de sólidos hacia el interior de sus intersticios (esto es, propensión mínima a los atascamientos)
3. Resistencia mínima a la corriente del filtrado (es decir, elevada velocidad de producción).
4. Resistencia a los ataques químicos.
5. Suficiente resistencia para soportar la presión de filtración.
6. Resistencia aceptable al desgaste mecánico.
7. Capacidad de descarga de la torta con facilidad y limpieza.
8. Capacidad de adaptación mecánica al tipo de filtro en el que se utilizará.
9. Costo mínimo.

Para la filtración con medios filtrantes se aplican las consideraciones 3, 4, 5, 8 y 9 de la lista anterior, y es preciso agregar

- a) Capacidad para retener los sólidos que se requieren
- b) Posibilidad de descarga de algunas hebras, pelusas o algún otro tipo de material en el filtrado.
- c) Capacidad para no colmatarse con rapidez (es decir, larga duración)

En la selección del medio filtrante se incluyen innumerables tipos de telas, tejidos de fibras, fieltro, o fibras no tejidas, y sólidos porosos o sintetizados, membranas poliméricas o sólidos particulados en forma de lecho permeable. Todos los medios filtrantes se encuentran disponibles en una gran variedad de materiales.

Telas de fibras tejidas. Para la filtración es muy común el uso de estas, existe una gran variedad de materiales y los más usuales son el poliéster, nylon, fibra de vidrio, acetato de celulosa, algodón, con sus factores de resistencia química y temperatura. Aparte del material de las fibras, ciertas características de construcción describen la tela filtrante:

1. Tejido
2. estilo
3. peso

4. cuenta
5. pliegues
6. el número de hilos

De los muchos tipos de tejidos disponibles, sólo cuatro son los más utilizados como medio filtrante: lisos (cuadrados), tejido, sarga, tejido de cadena, y satén.

Todos estos tejidos se puede confeccionar a partir de cualquier fibra textil, natural, sintética. Se pueden tejer con hilos multifilamento o monofilamento continuo. La capacidad y el desempeño de la tela para filtros depende del tipo de tejido y del tipo de hilo.

Telas metálicas o tamices. Existen en diferentes tipos de tejidos en níquel, cobre, bronce, aluminio, acero etc. Pero la ventaja de estos es que no tienen tendencia a la corrosión y son recomendables para filtraciones con altas temperaturas teniendo así una larga vida útil.

Filtros prensados y borra de algodón. Estos materiales se utilizan para la filtración de partículas de carácter gelatinoso como las de las pinturas. Los fieltros a base de agujas son los elementos mas usados, dentro de estos sistemas, para la filtración de líquidos.

Por su buena capacidad de retención, alta resistencia, y costo moderado estos sistemas tienen gran aceptación para uso en los filtros a presión, en particular para las aplicaciones relativas a la concentración de mineral. Son también utilizados en filtros horizontales de bandas ya que reduce la formación de pliegues.

Papel filtro. Estos presentan una gran gama de permeabilidad, espesores y resistencias. Como estos materiales poseen baja resistencia, requieren la colocación de una placa como soporte.

Porosos rígidos. Estos medios se encuentran disponibles como hojas, placas o tubos. Los materiales para su construcción incluyen acero inoxidable sintetizado y otros metales, grafito, óxido de aluminio, sílice, porcelana y algunos plásticos, gama que permite un amplio intervalos de resistencia a la temperatura y a los productos químicos. La mayor parte de las aplicaciones son y son para la clarificación.

Membranas poliméricas. Estas membranas se utilizan en las aplicaciones de filtración para la separación de partículas finas tales como microfiltración y ultrafiltración (la clarificación incluye la eliminación de partículas de 1µm y menores). Las membranas se fabrican con diferentes materiales y los más comunes son los acetatos de celulosa y las poliamidas.

Los medios filtrantes tanto tejidos como no tejidos pueden ser recubiertos con una película de un polímero, tal como el primapor, combinando la alta capacidad de retención característica de una membrana con la resistencia y durabilidad de un tejido grueso. Estos tipos son usados tanto en operaciones de filtración continuas o intermitentes en las que se necesita una excelente claridad de filtrado.

Lechos granulares de partículas sólidas. Los lechos con sólidos, como por ejemplo arena o carbón se utilizan como medio filtrante para la clarificación del agua o soluciones químicas que contienen pequeñas cantidades de partículas en suspensión.

Se pueden adquirir gránulos para filtros con el diámetro de partículas deseado. Con frecuencia, los lechos están constituidos por distintas capas de diferentes materiales y de diferentes tamaños de partículas.

2.2.5. Equipos para filtración

A continuación se van a describir las características, forma, tamaño, uso, etc., de algunos de los tipos de filtros prensa más comunes, para finalmente seleccionar el más apropiado de ellos.

Filtro prensa. El filtro prensa es uno de los tipos de prensa que con mas frecuencia se utilizaban en los primeros años de la industria química y actualmente aun se emplean. A menudo se le conoce en forma genérica y errónea, como filtro de placas y bastidor, y del que probablemente existen más de 100 variaciones en su diseño. Los dos diseños básicos más populares son el de placa de lavado o de placas y bastidor, y el filtro prensa de placas huecas. Ambos se encuentran disponibles y se construyen en gran variedad de materiales: metales con o sin recubrimiento, plásticos e incluso de madera.

Filtro prensa de placas y bastidor. Estos filtros presentan un montaje alternando placas cubiertas en ambos lados con un medio filtrante, que por lo general es tela y unos bastidores que proporcionan el espacio necesario para la acumulación a la torta, durante la operación de filtración.

En los bastidores existen unas aberturas para la alimentación de la corriente a filtrar y el lavado, en tanto que las placas tienen aberturas para los drenajes para el filtrado. Por lo general los bastidores y placas son rectangulares, también se utilizan los circulares o de otra geometría.

Los bastidores y placas que están colgados de un par de barras de apoyo horizontales y perpendiculares, se comprimen durante la filtración formándose un cierre estanco a prueba de agua, entre las placas terminales, siendo una de ellas fija.

La forma de cerrar la prensa puede ser manual, hidráulica o mediante un motor. Existen disposiciones para la alimentación y descarga del filtrado, la forma habitual para la alimentación y descarga de los diferentes elementos de la prensa es por una interconexión con unos pasantes localizados en las cuatro esquinas de cada una de los bastidores y placas (y de la tela filtrante), para formar canales longitudinales continuos desde la placa terminal que es fija hasta el extremo del filtro prensa.

El filtrado se puede drenar a cada placa por medio de una válvula y un grifo individual (descarga abierta) o un tubo (descarga cerrada). La alimentación por la parte superior y la descarga por el fondo de las cámaras proporcionan la recuperación máxima del filtrado y el secado máximo de la torta. Esta disposición es adecuada, sobre todo, para los sólidos más pesados que se sedimentan con rapidez. Para la mayor parte de las suspensiones, la alimentación se efectúa por la parte inferior y la descarga de filtrado por la parte superior, permitiendo un rápido desplazamiento del aire y una torta mas uniforme.

En los filtros prensa de placas y bastidores se utilizan dos técnicas de lavado.

En el lavado simple. El lavado sigue la misma trayectoria que la corriente filtrada. Si la torta no es muy uniforme y altamente permeable, esta forma de lavado no es eficaz en un filtro prensa lleno.

Lavado completo. En el que la corriente del lavado se introduce por las caras de las placas en una forma alternada. El lavado a filtrar cruza toda la torta y sale a través de otras caras. Esta técnica requiere un diseño especial y el montaje de las placas según un

determinado orden. El lavado completo solo debe utilizarse cuando se usan todos los bastidores llenos ya que un llenado incompleto de la torta permitirá que esta colapse durante la entrada del líquido de lavado y el resto de la corriente se desviará por las grietas o canales abiertos en la torta.

Los filtros prensa se fabrican con tamaños de placas que varían desde 10 por 10 centímetros hasta 1.5 por 1.8 metros. El espesor de los bastidores varía desde 0,3 hasta 20 centímetros. Son habituales presiones de operación hasta de 100 psi, pero existen diseñados para trabajar a 1000 psi. La presión máxima de operación para los bastidores en el caso de plástico o de madera es de 60 a 70 psi.

Las ventajas del filtro prensa son su sencillez, el bajo costo, la flexibilidad y la capacidad para operar a alta presión en las aplicaciones como equipo de filtración tipo torta filtrante o como filtro para clarificación. Las necesidades de superficie y de altura por unidad de área de filtro son pequeñas y su capacidad se puede ajustar mediante la adición o eliminación de las placas y bastidores. Los filtros prensa se limpian fácilmente y el medio filtrante se puede reemplazar con facilidad. Trabajando en forma adecuada se obtiene una torta mas seca y densa, en comparación con la que se obtiene con la mayor parte de los otros filtros.

Existen una serie de desventajas importantes que incluyen un lavado irregular, debido a la densidad variable de la torta, y la duración relativamente corta de la tela filtrante de vida al desgaste mecánico por vaciado y limpiado de filtro (que ha menudo incluye el raspado de la tela), además de las necesidades de la mano de obra que son elevadas. Con frecuencia estos filtros pueden gotear o tener fugas, en consecuencia, crean problema de limpieza, pero el mayor problema es la necesidad de abrir el filtro para descargar la torta, por lo que el operario esta expuesto, de forma rutinaria, al contenido del filtro.

Filtro prensa de placas huecas. Estos filtros son similares en apariencia en los de placas y bastidor, pero solo constan de placas. Ambas caras de cada placa son huecas, lo que forma una cámara en la que se acumula la torta entre las placas adyacentes. Este diseño tiene la ventaja de utilizar aproximadamente la mitad de las uniones que las que se usa en un filtro de placas y bastidores, lo que hace que el cierre a presión sea mas seguro. Se puede introducir aire a presión detrás de la tela, en ambos lados de cada placa, para ayudar a la retirada y eliminación de la torta.

En algunas de las variaciones más interesantes de los diseños normalizados se incluye la posibilidad de hacer girar el filtro para cambiar la entrada o la salida de la parte inferior a la superior, así como la capacidad de intercalar divisores o espaciadores vacíos para convertir el filtro en una prensa multietapa, con el objetivo de conseguir una mejor clarificación de la corriente a filtrar o realizar dos filtraciones simultáneas y separadas en el mismo equipo. Algunos de los diseños tienen unas membranas o diafragmas entre las placas, que se pueden expandir cuando termina la filtración permitiendo exprimir y eliminar la humedad adicional. Otros se caracterizan por la inclusión de un sistema automático para realizar la apertura y descarga de la torta para reducir las necesidades de mano de obra.

Equipo de torta. Los filtros en los que se acumula cantidades apreciables y visibles de sólidos sobre la superficie del medio filtrante se conocen como filtro de torta.

La suspensión de alimentación puede contener una concentración de sólidos que va desde el 1 por 100 hasta más del 40 por 100. El medio filtrante sobre el que se forma la torta es relativamente abierto para minimizar la resistencia al flujo, ya que, una vez se consigue la torta, esta se vuelve el medio filtrante efectivo.

Por consiguiente el filtrado inicial puede contener una cantidad de sólidos hasta que se logra la formación de la torta. Esta situación se puede tolerar si se realiza una recirculación del filtrado hasta conseguir una cantidad suficiente, o bien la instalación de un segundo filtro aguas abajo. Desde el punto de vista de la operación, algunos equipos de filtración son dispositivos, que operan en régimen intermitente mientras que otros son continuos.

Filtro prensa de placas y marcos. Este tipo de filtro es ampliamente usado en los sectores alimentario, farmacéutico, cervecero y de destilación. La unidad, de tamaño de laboratorio, es robusta y versátil y ha sido diseñada para permitir la demostración clara del modo de operación y un alto grado de experimentación para su posterior paso a procesos industriales.

La unidad está montada en un bastidor de suelo de acero inoxidable, que aloja el filtro, la bomba de alimentación y las tuberías. También se incluye una bandeja de goteo de

acero inoxidable. Se suministra una selección de medios filtrantes de diferentes grados a fin de poder encontrar combinaciones óptimas para una operación de filtrado determinada. Se suministran cuatro grados de medios filtrantes, adecuados para: filtración con prerecubrimiento, clarificación gruesa, pulido y esterilización.

El pequeño paquete de placas de acero inoxidable facilita el manejo, haciendo más cómodas las demostraciones didácticas. El paquete filtrante situado entre los cabezales está compuesto de un marco final y tres marcos intermedios para el lodo, y una placa filtrante final y tres placas intermedias. El filtro acepta un total de 7 hojas filtrantes de 200mm x 200mm, dando una superficie filtrante nominal de 0,22m² y una capacidad nominal de sólidos de 1,5 litros.

El lodo a filtrar es conectado mediante una manguera a la aspiración de la bomba, y la bomba es conectada a una fuente de alimentación eléctrica apropiada. Una manguera acoplada a la salida del filtro lleva el filtrado limpio a un recipiente adecuado. El paquete de placas ha sido diseñado para permitir el lavado de la torta al completarse el proceso de filtración. Se utiliza un manómetro, situado en la entrada del filtro, para monitorizar el proceso de filtración como se observa en la fotografía 2.2.



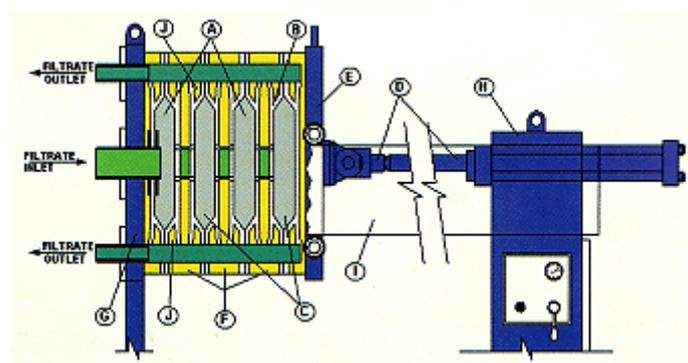
Fotografía 2.2.: Filtro prensa de placas o marcos

www.armfield.co.uk

Filtro de placas horizontales. El filtro de control a presión de placas múltiples consta de un conjunto de placas horizontales, de forma circular y unas guías, para el drenado alojado de una carcasa cilíndrica. Habitualmente, la presión para filtración esta limitada a 50 psi; sin embargo existen filtros especiales para operar a presiones de 300 psi o mayores.

Filtros continuos a presión. Estos filtros consisten en un típico tambor de discos alojado en un recipiente sometido a presión. La filtración tiene lugar en el recipiente presurizado y el filtrado se descarga bien a presión atmosférica o en un equipo para el mantenimiento de la presión de descarga. La descarga de la torta se facilita con una válvula doble que activa o bloquea la tolva para mantener la presión en el recipiente. Alternativamente, la torta descargada puede ser resuspendida en el filtrado e ingresar en un recipiente a presión y eliminar en una válvula de control.

Filtro prensa de placas ACS. Es un separador de líquidos y sólidos a través de filtración por presión. Utiliza un método simple y confiable para lograr una alta compactación. Es capaz de comprimir y deshidratar sólidos hasta obtener del 25% al 60% por peso de los lodos compactados. Tiene una capacidad que va desde 0.5 a 300 pies cúbicos. Se fabrica en acero al carbón con recubrimiento de pintura epóxica de alta resistencia química o acero inoxidable. Las placas filtrantes desmontables están hechas de polipropileno, y las mallas pueden ser de tipo selladas, no selladas o membranas de alta resistencia. Cuenta con un sistema hidráulico-neumático que puede ser automático, semiautomático.



Fotografía 2.5.: Esquema de funcionamiento del filtro prensa ACS
www.acsmedioambiente.com

Como funciona.

El lodo líquido es bombeado a las CAMARAS

- A) rodeadas por LONAS filtrantes
 - B) Al bombear la presión se incrementa y fuerza al lodo a atravesar las lonas, provocando que los sólidos se acumulen y formen una PASTA seca
 - C) El PISTON
 - D) hidráulico empuja la PLACA de acero
 - E) contra las PLACAS de polietileno
 - F) haciendo la prensa. El CABEZAL
 - G) y el SOPORTE terminal
 - H) son sostenidos por rieles de las BARRAS de soporte
 - I) diseñados especialmente
- El filtrado pasa a través de las lonas y es dirigido hacia los canales de las placas y PUERTOS de drenado
- J) del cabezal para descarga. Este filtrado típicamente contendrá menos de 15 ppm (mg/l) en sólidos suspendidos. La torta es fácilmente removida haciendo retroceder

el pistón neumático, relajando la presión y separando cada una de las placas, para permitir que la pasta compactada caiga desde la cámara.

1.3. Palma africana

El aceite de palma es un alimento natural que se viene consumiendo desde hace 5.000 años. Se refina sin necesidad de disolventes químicos, por lo que se reduce el riesgo de contaminación por residuos.

El aceite de palma contiene iguales proporciones de ácidos grasos no saturados, conteniendo alrededor del 40% de ácido oleico (no monosaturado), 10% de ácido linoléico (no polisaturado), 44% de ácido palmítico (saturado) y 5% de ácido esteárico (saturado). Éste aceite es una fuente natural de vitamina E, tocoferoles y tocotrienoles y el aceite de palma sin refinar también es una fuente importante de vitamina A. El aceite de palma tiene un contenido glicérido sólido alto que lo hace semisólido normalmente se usa en estado natural, sin hidrogenar.

2.3.1. Subproductos de la industria extractora de aceite de palma africana

En la industria extractora de aceite de palma africana se generan varios subproductos, como palmiste, aceite crudo, raquís, aguas residuales, entre otros; los cuales tienen diferentes aplicaciones como el palmiste, que es utilizado para la producción de otro tipo de aceite; el aceite crudo es recuperado para la producción de jabones; el raquís es quemado para la producción de energía calórica, para los diferentes procesos, y las efluentes líquidos por su gran contenido de materia orgánica, pero este teniendo poco interés, además de tener muy poco conocimiento científico sobre los efluentes; al ser filtrados se genera una torta rica en nutrientes, aceite, proteínas, vitaminas A, E, etc., pudiendo ser utilizada en la agricultura como abono.

CAPÍTULO III: PARTE EXPERIMENTAL

3.2. Procedimientos y métodos de ensayo

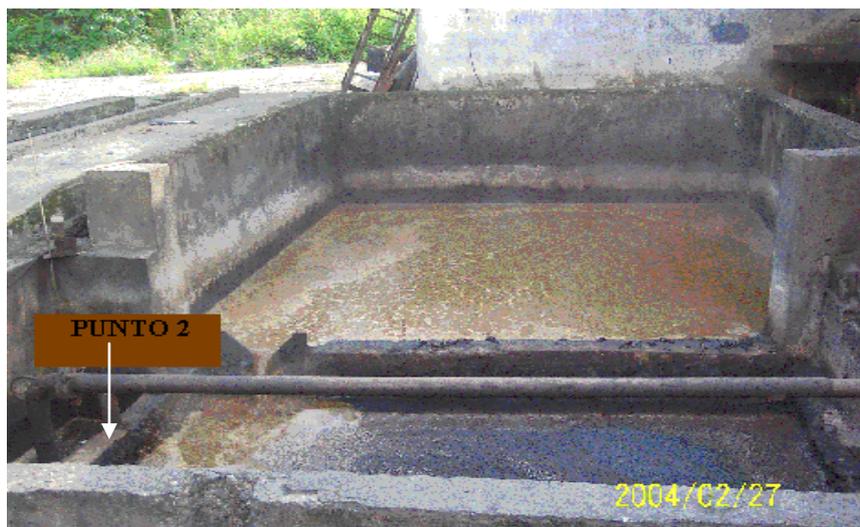
Para el presente estudio se utilizaron varios métodos de ensayo basados en procedimientos con estándares universales que a continuación serán descritos, además de realizar mediciones in situ de algunos parámetros (pH, temperatura, caudal, etc.) que fueron necesarios para la caracterización del efluente, y en caso de la medición de otros parámetros (sólidos totales, sólidos suspendidos) se tomaron muestras que en su mayoría fueron compuestas, para su posterior análisis en el laboratorio de la planta extractora AIQUISA, y en algunos de los casos se preservaron las muestras para ser analizadas en el laboratorio de la Universidad Internacional SEK.

3.2.1. Puntos de muestreo

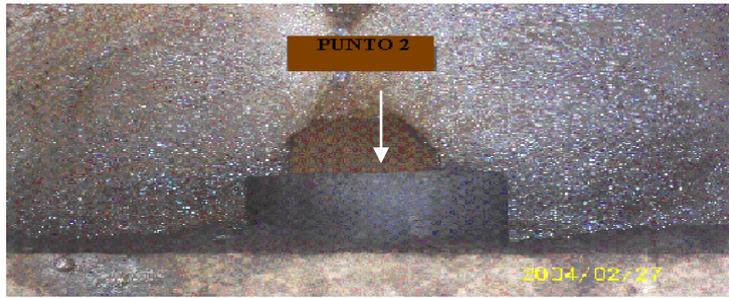
El primer paso es la caracterización del efluente para saber, que tipo de efluente estamos tratando, además de verificar la eficiencia de el sistema actual de tratamiento; se tomaron muestras en el **punto 1** (fotografía 3.1) a la entrada de los florentinos, y el **punto 2** (fotografía 3.2 y 3.3) a la salida del sistema es decir a la salida del sedimentador.



Fotografía 3.1.: Punto 1 de Muestreo



Fotografía 3.2.: Punto 2 de Muestreo: Vista Frontal



Fotografía 3.3.: Punto 2 de Muestreo: Vista Superior

3.2.2. Plan de Muestreo

En la primera fase del muestreo, luego de haber escogido los puntos de muestreo se recolectaron muestras simples cada media hora con un volumen de 250ml, y midiendo a su vez pH, temperatura, y caudal (el caudal se media en un vertedero en V de 90°) durante 5 horas al final se reunieron las 10 muestras simples tomadas en un recipiente convirtiéndose en una muestra compuesta, para su posterior análisis en el laboratorio. El objetivo de este primer muestreo es la caracterización del efluente (sólidos totales y sólidos suspendidos), además de verificar la eficiencia del sistema actual de tratamiento del efluente.

Una vez establecidos los puntos de muestreo en la segunda fase de muestreo, se mantuvo el tiempo de recolección de 5 horas con la diferencia, que en esta fase se tomaron muestras simples cada 10 minutos de 50ml; mezclándolas cada media para formar una muestra compuesta de 150ml, manteniendo las mediciones de pH, Temperatura, caudal y finalmente obteniendo 10 muestras que fueron analizadas en el laboratorio.

En la tercera fase del muestreo se procedió a tomar muestras puntuales para realizar las pruebas de tratabilidad, en el caso de la coagulación / floculación se utilizó la prueba de jarras, para estas pruebas se tomaban muestras de 6 litros, para cada prueba.

Para los ensayos de filtración se tomó una muestra de gran volumen de la que posteriormente se tomaban diferentes volúmenes de muestra dependiendo de la prueba que se iba a realizar; esto se hizo con la finalidad de tener una concentración inicial homogénea de sólidos totales y de sólidos suspendidos, para luego comparar las concentraciones después de realizar las pruebas y obtener por ejemplo el porcentaje de remoción de los sólidos.

3.1.2.1 Preservación de muestras

La preservación de las muestras para este estudio no fue necesaria en la mayoría de los muestreos ya que los análisis de las muestras se realizaban en el laboratorio de la Planta, pero en el caso de que las pruebas se realizaban en el laboratorio de la Universidad Internacional SEK, se las enfriaba a 4° C aproximadamente, colocándolas en coolers, y tratando de realizar los análisis y las pruebas lo más pronto posible.

Para todos los muestreos realizados se marcaron todos los recipientes, registrando fecha, hora, número, etc., para evitar posteriores confusiones.

3.2. Métodos de Análisis

En este estudio los métodos que se utilizaron fueron gravimétricos (diferencia de pesos), ya que se efectuaron análisis de sólidos totales y sólidos suspendidos.

3.2.1. Análisis de Sólidos Totales

- Pesar el vaso de precipitación marcado, vacío y seco, después de haber estado en la estufa a 105 °C.
- Colocar 50ml de muestra, previa agitación.
- Dejar de 24 a 48 horas en la estufa el vaso con la muestra a 105°C para que se evapore toda el agua y obtener los sólidos secos.
- Pesar el vaso más el residuo seco.

La diferencia de pesos entre el vaso seco y el vaso seco más muestra es la cantidad de sólidos totales en 50ml de muestra, por lo tanto se puede expresar este resultado en unidades de concentración como partes por millón (ppm o mg/L) de sólidos totales.

3.2.2. Análisis de Sólidos Suspendidos

- Pesar un vaso de precipitación marcado, vacío y seco, después de haber estado en la estufa a 105 °C.
- Pesar el papel filtro.
- Agitar y se filtrar 50ml de muestra (con papel filtro cualitativo).
- Dejar de 24 a 48 horas en la estufa el papel filtro más los sólidos retenidos a 105°C para que se evapore toda el agua y obtener los sólidos secos.

- Pesar el papel filtro más el residuo seco.

La diferencia de pesos entre el papel filtro y el papel filtro más residuo es la cantidad de sólidos suspendidos en 50ml de muestra, por lo tanto se puede expresar este resultado en unidades de concentración como partes por millón (ppm o mg/L) de sólidos suspendidos.

3.2.3. Análisis de Densidad

- Pesar el balón vacío
- Colocar 50ml de muestra hasta la línea de aforo
- Pesar el balón con la muestra

La diferencia de pesos entre el balón vacío y el balón más muestra, y esto dividido para el volumen de muestra se obtiene el valor de la densidad del efluente.

3.3. Pruebas de Tratabilidad

Se realizaron varias pruebas de tratabilidad, tanto en el laboratorio de la Universidad Internacional SEK como en el laboratorio de AIQUISA, las que serán descritas a continuación:

3.3.1. Pruebas de Coagulación / Flocculación

- Se realizaron algunas pruebas de jarras en las que se probó varios coagulantes inorgánicos como Sulfato de aluminio comercial $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, Cloruro férrico $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, que son los más comunes para este tipo de pruebas.
- Se utilizaron también ayudantes de coagulación o floculantes de vario tipos como el Almidón (polímero orgánico), Envifloc (polielectrolito aniónico), Nalco 7510 (polielectrolito catiónico), y Nalco 7530 (polielectrolito no iónico).

- Los coagulantes y los ayudantes de coagulación o floculantes fueron probados en varias dosis.
- En virtud de que, la temperatura y el pH tienen gran influencia en la coagulación / floculación, fueron ensayados variando estos parámetros; en el caso del pH se probó con pH ácido que corresponde al valor original del efluente (4,6) y con pH básico (9); la temperatura fue variada enfriando el efluente (20°C) y realizando pruebas a temperatura alta (55°C) que es la original del efluente.
- También se ensayó con una dilución del efluente con diferentes proporciones y realizando la respectiva prueba de jarras para cada dilución.
- Posteriormente se variaron los tiempos de agitación rápida, lenta, y reposo.
- Además, se realizaron pruebas adicionando sal común (Cloruro de sodio; NaCl) para tratar que las partículas suspendidas se carguen eléctricamente.
- En todas estas pruebas se evaluó la turbidez residual después de cada prueba realizada, utilizándose este parámetro como criterio de calidad de coagulación / floculación.

3.3.2. Filtración

- Se probaron diferentes tipos de filtros como el papel filtro cualitativo, cuantitativo, fieltro, este último uno de los más comunes en los filtros prensa por su durabilidad, costo, etc.
- Se analizó el tiempo que se demoraba filtrar un volumen conocido de muestras con cada tipo de filtro y la remoción de los sólidos suspendidos con cada uno de los tipos de filtros.

- Se realizaron pruebas de filtración por gravedad con cada uno de los tipos de filtros, tomando en cuenta el tiempo de filtración.
- También se ensayaron pruebas de filtración al vacío con cada uno de los tipos de filtros, tomando en cuenta el tiempo de filtración para comparar con la filtración por gravedad.
- Se varió el parámetro de temperatura en los ensayos de filtración, enfriando el efluente a 20°C además de realizar pruebas a temperatura alta de 55°C.
- Posteriormente se realizaron pruebas de filtración para obtener el tiempo de saturación del filtro en este caso se utilizó el fieltro.
- Se analizó la forma más eficiente del lavado de los fieltros para su reutilización, y se analizó cual es la mejor manera de remover la torta filtrante.
- Otros ensayos realizados de filtración que consistieron en filtrar el efluente en serie y en paralelo preparando unas bandejas filtrantes evaluando la eficiencia de cada uno.
- En todas estas pruebas se evaluó la turbidez residual después de cada prueba realizada, utilizándose este parámetro como criterio de calidad de filtración; además se evaluó la cantidad de lodo retenido.
- Finalmente se realizaron pruebas para la determinación de la densidad del efluente líquido.

3.4. Datos Experimentales

3.4.1. Caracterización físico - química del efluente

Primer Muestreo

Tabla 3.1.: Caudal, pH, temperatura a la entrada y a la salida del sistema de tratamiento

Muestreo # 1(*)			Fecha: 15/01/2004			
Tipo de Muestra: Compuesta			Volumen de Muestra: 250ml			
Frecuencia: 30 minutos			Entrada al Sistema		Salida del Sistema	
Muestra #	Hora	Caudal (L/s)	pH	Temperatura (°C)	pH	Temperatura (°C)
1	10:30	2,6	4,53	60,3	4,57	53,9
2	11:00	2,4	4,51	58,0	4,54	57,3
3	11:30	2,2	4,49	62,1	4,56	54,8
4	12:00	3,1	4,68	64,4	4,55	56,5
5	12:30	2,6	4,62	63,7	4,61	57,7
6	13:00	2,8	4,53	62,7	4,62	58,9
7	13:30	2,2	4,53	64,0	4,66	56,4
8	14:30	1,9	4,59	61,2	4,67	56,3
9	15:00	2,0	4,78	60,1	4,63	54,7
10	15:30	1,9	4,57	60,3	4,68	54,3
	Promedio	2,4	4,58	61,7	4,61	56,1

(*) Se tomaron 10 muestras simples para formar una muestra compuesta

Tabla 3.2.: Concentración de Sólidos totales y Sólidos suspendidos a la entrada y salida del sistema de tratamiento.

Volumen de Muestra: 100ml		Entrada al Sistema				Salida del Sistema			
Parámetro	Unidad	M 1	M 2	M 3	Prom.	M 1	M 2	M 3	Prom.
Sólidos Totales	mg/L	46739	46234	45953	46309	44283	43645	43948	43959
Sólidos Suspendidos	mg/L	23863	23950	23538	23783	14313	13588	13688	13863

Segundo Muestreo

Tabla 3.3.: Caudal, pH, temperatura a la entrada y a la salida del sistema de tratamiento

Muestreo # 2(*)			Fecha: 27/02/2004			
Tipo de Muestra: Compuesta			Volumen de Muestra: 250ml			
Frecuencia: 30 minutos			Entrada al Sistema		Salida del Sistema	
Muestra #	Hora	Caudal (L/s)	pH	Temperatura (°C)	pH	Temperatura (°C)
1	16:00	1,8	4,87	61	5,01	59
2	16:30	2,2	5,01	65	5,02	61

3	17:00	2,9	5,06	62	5,01	59
4	17:30	3,2	4,98	63	5,06	58
5	18:00	3,1	4,97	65	5,01	61
6	18:30	3,1	4,94	66	5,00	59
7	19:00	2,8	4,95	65	5,01	59
8	19:30	3,1	4,95	66	4,96	60
9	20:00	2,6	4,91	66	4,93	62
10	20:30	2,8	4,97	65	4,95	61
	Promedio	2,8	4,96	64	5,00	60

(*) Se tomaron 10 muestras simples para formar una muestra compuesta

Tabla 3.4.: Concentración de Sólidos totales y Sólidos suspendidos a la entrada y salida del sistema de tratamiento.

Volumen de Muestra: 100 ml		Entrada al Sistema				Salida del Sistema			
Parámetro	Unidad	M 1	M 2	M 3	Prom.	M 1	M 2	M 3	Prom.
Sólidos Totales	mg/L	48091	62667	55003	55254	42797	45447	46279	44841
Sólidos Suspendidos	mg / L	23213	19463	19813	20829	13775	14988	15550	14771

Tercer muestreo

Tabla 3.5.: Caudal, pH, temperatura a la entrada y a la salida del sistema de tratamiento

Muestreo # 3(*)			Fecha: 11/03/2004			
Tipo de Muestra: Compuesta		Volumen de Muestra: 250ml				
Frecuencia: 30 minutos		Entrada al Sistema		Salida del Sistema		
Muestra #	Hora	Caudal (L/s)	pH	Temperatura (°C)	pH	Temperatura (°C)
1	16:00	3,0	5,13	65	5,10	58

2	16:30	2,6	5,01	63	5,06	60
3	17:00	2,4	4,97	64	5,01	60
4	17:30	2,3	5,01	62	5,05	59
5	18:00	1,9	5,00	59	5,04	59
6	18:30	2,1	5,00	59	5,02	59
7	19:00	2,1	5,17	59	4,97	58
8	19:30	4,2	5,00	53	5,03	56
9	20:00	3,2	4,97	58	5,07	53
10	20:30	3,2	5,01	59	5,04	55
	Promedio	2,7	5,03	60	5,04	58

(*) Se tomaron 10 muestras simples para formar una muestra compuesta

Tabla 3.6.: Concentración de Sólidos totales y Sólidos suspendidos a la entrada y salida del sistema de tratamiento.

Volumen de Muestra: 100 ml		Entrada al Sistema						Salida del Sistema					
Parámetro	Unidad	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	Prom.	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	Prom.
Sólidos Totales	mg / L	59426	47426	68220	44960	47926	53592	48506	58240	58273	65126	56126	57254
Sólidos Suspendidos	mg / L	23862	23950	23537	-----	-----	23783	14312	13587	13687	-----	-----	13863

Cuarto muestreo

Tabla 3.7.: Caudal, pH, temperatura a la entrada y a la salida del sistema de tratamiento

Muestreo # 4(*)				Fecha: 25/03/2004			
Tipo de Muestra: Compuesta			Volumen de Muestra: 50ml				
Frecuencia: 10 minutos			Entrada al Sistema		Salida del Sistema		
Muestra #	Hora	Caudal (L/s)	pH	Temperatura (°C)	pH	Temperatura (°C)	

1	15:00	3,2	4,76	52	4,85	51
2	15:30	2,9	4,76	54	4,88	51
3	16:00	2,3	4,81	56	4,88	50
4	16:30	3,1	4,83	55	4,88	51
5	17:00	3,0	4,76	54	4,91	52
6	17:30	3,1	4,75	52	4,87	53
7	18:00	2,8	4,74	54	4,88	54
8	18:30	2,4	4,77	59	4,84	55
9	19:00	2,8	4,86	57	4,83	54
10	19:30	2,6	4,82	55	4,88	54
	Promedio	2,8	4,79	55	4,87	53

(*) Se tomaron cada 10 minutos muestras simples para formar una muestra compuesta a la media hora y a su vez se formó una muestra compuesta de 10 muestras simples.

Tabla 3.8.: Concentración de Sólidos totales y Sólidos suspendidos a la entrada y salida del sistema de tratamiento.

Volumen de Muestra: 50ml		Entrada al Sistema		Salida del Sistema	
Muestra #	Unidad	Sólidos Totales	Sólidos Suspendidos	Sólidos Totales	Sólidos Suspendidos
1	mg / L	62150	40680	54840	25660
2	mg / L	49840	29980	46400	26920
3	mg / L	38000	20280	44080	25320
4	mg / L	56210	36060	38610	20040
5	mg / L	68200	46780	45970	25940
6	mg / L	66240	46700	51140	29500
7	mg / L	56740	30760	53100	30920
8	mg / L	45500	26940	47390	26260
9	mg / L	49731	25580	45670	23260
10	mg / L	43470	23520	43370	23060
	Promedio	53608	32728	47057	25688

3.6. Pruebas de Tratabilidad

3.6.1. Coagulación / Floculación

Tabla 3.9.: Ensayo de Coagulación del efluente

Coagulante	Sulfato de Aluminio comercial	Temperatura del agua	55 °C	pH	4,6
Volumen de	1000 ml	Mezcla:		rápida: 1min	

muestra		lenta: 9 min reposo: 5 min
Jarra #	Dosis de Coagulante (mg/L)	Turbidez Residual (FTU)
1	0	>> 3000
2	100	>> 3000
3	150	>> 3000
4	200	>> 3000
5	250	>> 3000
6	300	>> 3000

(*) >>: Sobre el rango máximo de medición

Tabla 3.10.: Ensayo de Coagulación del efluente

Coagulante	Sulfato de Aluminio comercial	Temperatura del agua	55 °C	pH	9
Volumen de muestra	1000 ml	Mezcla:	rápida: 1min lenta: 9 min reposo: 5 min		
Jarra #	Dosis de Coagulante (mg/L)	Turbidez Residual (FTU)			
1	0	>> 3000			
2	100	>> 3000			
3	150	>> 3000			
4	200	>> 3000			
5	250	>> 3000			
6	300	>> 3000			

(*) >>: Sobre el rango máximo de medición

Tabla 3.11.: Ensayo de Coagulación del efluente

Coagulante	Sulfato de Aluminio comercial	Temperatura del agua	21 °C	pH	4,6
Volumen de muestra	1000 ml	Mezcla:	rápida: 1min lenta: 9 min reposo: 5 min		
Jarra #	Dosis de Coagulante (mg/L)	Turbidez Residual (FTU)			
1	0	>> 3000			
2	100	>> 3000			
3	150	>> 3000			

4	200	>> 3000
5	250	>> 3000
6	300	>> 3000

(*) >>: Sobre el rango máximo de medición

Tabla 3.12.: Ensayo de Coagulación del efluente

Coagulante	Sulfato de Aluminio comercial	Temperatura del agua	21 °C	pH	9
Volumen de muestra	1000 ml	Mezcla: rápida: 1min lenta: 9 min reposo: 5 min			
Jarra #	Dosis de Coagulante (mg/L)	Turbidez Residual (FTU)			
1	0	>> 3000			
2	100	>> 3000			
3	150	>> 3000			
4	200	>> 3000			
5	250	>> 3000			
6	300	>> 3000			

(*) >>: Sobre el rango máximo de medición

Tabla 3.13.: Ensayo de Coagulación del efluente

Coagulante	Cloruro Férrico	Temperatura del agua	55 °C	pH	4,6
Volumen de muestra	1000 ml	Mezcla: rápida: 1min lenta: 9 min reposo: 5 min			
Jarra #	Dosis de Coagulante (mg/L)	Turbidez Residual (FTU)			
1	0	>> 3000			
2	100	>> 3000			
3	150	>> 3000			
4	200	>> 3000			
5	250	>> 3000			
6	300	>> 3000			

(*) >>: Sobre el rango máximo de medición

Tabla 3.14.: Ensayo de Coagulación del efluente

Coagulante	Cloruro Férrico	Temperatura del agua	55 °C	pH	9
Volumen de muestra	1000 ml	Mezcla: rápida: 1min lenta: 9 min reposo: 5 min			
Jarra #	Dosis de Coagulante (mg/L)	Turbidez Residual (FTU)			
1	0	>> 3000			
2	100	>> 3000			
3	150	>> 3000			

4	200	>> 3000
5	250	>> 3000
6	300	>> 3000

(*) >>: Sobre el rango máximo de medición

Tabla 3.15.: Ensayo de Coagulación del efluente

Coagulante	Cloruro Férrico	Temperatura del agua	21 °C	pH	4,6
Volumen de muestra	1000 ml	Mezcla: rápida: 1min lenta: 9 min reposo: 5 min			
Jarra #	Dosis de Coagulante (mg/L)		Turbidez Residual (FTU)		
1	0		>> 3000		
2	100		>> 3000		
3	150		>> 3000		
4	200		>> 3000		
5	250		>> 3000		
6	300		>> 3000		

(*) >>: Sobre el rango máximo de medición

Tabla 3.16.: Ensayo de Coagulación del efluente

Coagulante	Cloruro Férrico	Temperatura del agua	21 °C	pH	9
Volumen de muestra	1000 ml	Mezcla: rápida: 1min lenta: 9 min reposo: 5 min			
Jarra #	Dosis de Coagulante (mg/L)		Turbidez Residual (FTU)		
1	0		>> 3000		
2	100		>> 3000		
3	150		>> 3000		
4	200		>> 3000		
5	250		>> 3000		
6	300		>> 3000		

(*) >>: Sobre el rango máximo de medición

Tabla 3.17.: Ensayo de Coagulación del efluente previa dilución del efluente con agua del río (1:3).

Coagulante	Polelectrolito no-iónico (poliacrilamida) Nalco 7530	Temperatura del agua	55 °C	pH	4,6
Volumen de muestra	1000 ml	Mezcla: rápida: 1min lenta: 9 min			

Jarra #	Dosis (mg/L)	Turbidez Residual (FTU)
1	50	1527
2	100	869
3	150	597
4	200	616
5	250	244
6	300	213

Tabla 3.18.: Ensayo de Coagulación del efluente

Coagulante	Poliectrolito no-iónico (poliacrilamida) Nalco 7530	Temperatura del agua	55 °C	pH	4,6
Volumen de muestra	1000 ml	Mezcla:	rápida: 1min lenta: 9 min reposo: 5 min		
Jarra #	Dosis (mg/L)	Turbidez Residual (FTU)			
1	0	>> 3000			
2	100	>> 3000			
3	150	>> 3000			
4	200	>> 3000			
5	250	>> 3000			
6	300	>> 3000			

(*) >>: Sobre el rango máximo de medición

Tabla 3.19.: Ensayo de Coagulación del efluente

Coagulante	Poliectrolito no-iónico (poliacrilamida) Nalco 7530	Temperatura del agua	55 °C	pH	9
Volumen de muestra	1000 ml	Mezcla:	rápida: 1min lenta: 9 min reposo: 5 min		
Jarra #	Dosis (mg/L)	Turbidez Residual (FTU)			
1	0	>> 3000			
2	100	>> 3000			

3	150	>> 3000
4	200	>> 3000
5	250	>> 3000
6	300	>> 3000

(*) >>: Sobre el rango máximo de medición

Tabla 3.20.: Ensayo de Coagulación del efluente

Coagulante	Polielectrolito no-iónico (poliacrilamida) Nalco 7530	Temperatura del agua	21 °C	pH	4,6
Volumen de muestra	1000 ml	Mezcla: rápida: 1min lenta: 9 min reposo: 5 min			
Jarra #	Dosis (mg/L)	Turbidez Residual (FTU)			
1	0	>> 3000			
2	100	>> 3000			
3	150	>> 3000			
4	200	>> 3000			
5	250	>> 3000			
6	300	>> 3000			

(*) >>: Sobre el rango máximo de medición

Tabla 3.21.: Ensayo de Coagulación del efluente

Coagulante	Polielectrolito no-iónico (poliacrilamida) Nalco 7530	Temperatura del agua	21 °C	pH	9
Volumen de muestra	1000 ml	Mezcla: rápida: 1min lenta: 9 min reposo: 5 min			
Jarra #	Dosis (mg/L)	Turbidez Residual (FTU)			

1	0	>> 3000
2	100	>> 3000
3	150	>> 3000
4	200	>> 3000
5	250	>> 3000
6	300	>> 3000

(*) >>: Sobre el rango máximo de medición

Tabla 3.22.: Ensayo de Coagulación del efluente

Coagulante	Sulfato de Aluminio comercial	Ayudante de Coagulación	Poliectrolito no-iónico (poliacrilamida) Nalco 7530	Temperatura del agua	55 °C	pH	4,6
Volumen de muestra	1000 ml			Mezcla:	rápida: 1min lenta: 9 min reposo: 5 min		
Jarra #	Dosis de Coagulante (mg/L)		Dosis de Ayudante (mg/L)	Turbidez Residual (FTU)			
1	0		0	>> 3000			
2	50		180	>> 3000			
3	100		180	>> 3000			
4	150		180	>> 3000			
5	200		180	>> 3000			
6	300		180	>> 3000			

(*) >>: Sobre el rango máximo de medición

Tabla 3.23.: Ensayo de Coagulación del efluente

Coagulante	Sulfato de Aluminio comercial	Ayudante de Coagulación	Poliectrolito no-iónico (poliacrilamida) Nalco 7530	Temperatura del agua	55 °C	pH	4,6
Volumen de muestra	1000 ml			Mezcla:	rápida: 1min lenta: 9 min reposo: 5 min		
Jarra #	Dosis de Coagulante (mg/L)		Dosis de Ayudante (mg/L)	Turbidez Residual (FTU)			
1	0		0	>> 3000			

2	150	180	>> 3000
3	150	260	>> 3000
4	150	340	>> 3000
5	150	420	>> 3000
6	150	500	>> 3000

(*) >>: Sobre el rango máximo de medición

Tabla 3.24.: Ensayo de Coagulación del efluente

Coagulante	Sulfato de Aluminio comercial	Ayudante de Coagulación	Poliectrolito no-iónico (poliacrilamida) Nalco 7530	Temperatura del agua	21 °C	pH	4,6
Volumen de muestra	1000 ml			Mezcla:	rápida: 1 min lenta: 9 min reposo: 5 min		
Jarra #	Dosis de Coagulante (mg/L)		Dosis de Ayudante (mg/L)	Turbidez Residual (FTU)			
1	0		0	>> 3000			
2	50		180	>> 3000			
3	100		180	>> 3000			
4	150		180	>> 3000			
5	200		180	>> 3000			
6	300		180	>> 3000			

(*) >>: Sobre el rango máximo de medición

Tabla 3.25.: Ensayo de Coagulación del efluente

Coagulante	Sulfato de Aluminio comercial	Ayudante de Coagulación	Poliectrolito no-iónico (poliacrilamida) Nalco 7530	Temperatura del agua	21 °C	pH	4,6
Volumen de muestra	1000 ml			Mezcla:	rápida: 1 min lenta: 9 min reposo: 5 min		
Jarra #	Dosis de Coagulante (mg/L)		Dosis de Ayudante(mg/L)	Turbidez Residual (FTU)			

1	0	0	>> 3000
2	150	180	>> 3000
3	150	260	>> 3000
4	150	340	>> 3000
5	150	420	>> 3000
6	150	500	>> 3000

(*) >>: Sobre el rango máximo de medición

Tabla 3.26.: Ensayo de Coagulación del efluente

Coagulante	Sulfato de Aluminio comercial	Ayudante de Coagulación	Polielectrolito no-iónico (poliacrilamida) Nalco 7530	Temperatura del agua	55 °C	pH	9
Volumen de muestra	1000 ml			Mezcla:	rápida: 1 min lenta: 9 min reposo: 5 min		
Jarra #	Dosis de Coagulante (mg/L)		Dosis de Ayudante(mg/L)	Turbidez Residual (FTU)			
1	0		0	>> 3000			
2	50		180	>> 3000			
3	100		180	>> 3000			
4	150		180	>> 3000			
5	200		180	>> 3000			
6	300		180	>> 3000			

(*) >>: Sobre el rango máximo de medición

Tabla 3.27.: Ensayo de Coagulación del efluente

Coagulante	Sulfato de Aluminio comercial	Ayudante de Coagulación	Polielectrolito no-iónico (poliacrilamida) Nalco 7530	Temperatura del agua	55 °C	pH	9
Volumen de muestra	1000 ml			Mezcla:	rápida: 1 min lenta: 9 min reposo: 5 min		

Jarra #	Dosis de Coagulante (mg/L)	Dosis de Ayudante (mg/L)	Turbidez Residual (FTU)
1	0	0	>> 3000
2	150	180	>> 3000
3	150	260	>> 3000
4	150	340	>> 3000
5	150	420	>> 3000
6	150	500	>> 3000

(*) >>: Sobre el rango máximo de medición

Tabla 3.28.: Ensayo de Coagulación del efluente

Coagulante	Sulfato de Aluminio comercial	Ayudante de Coagulación	Poliectrolito no-iónico (poliacrilamida) Nalco 7530	Temperatura del agua	21 °C	pH	9
Volumen de muestra	1000 ml		Mezcla:		rápida: 1min lenta: 9 min reposo: 5 min		
Jarra #	Dosis de Coagulante (mg/L)	Dosis de Ayudante (mg/L)	Turbidez Residual (FTU)				
1	0	0	>> 3000				
2	50	180	>> 3000				
3	100	180	>> 3000				
4	150	180	>> 3000				
5	200	180	>> 3000				
6	300	180	>> 3000				

(*) >>: Sobre el rango máximo de medición

Tabla 3.29.: Ensayo de Coagulación del efluente

Coagulante	Sulfato de Aluminio comercial	Ayudante de Coagulación	Poliectrolito no-iónico (poliacrilamida) Nalco 7530	Temperatura del agua	21 °C	pH	9
Volumen de muestra	1000 ml		Mezcla:		rápida: 1min lenta: 9 min		

		reposo: 5 min	
Jarra #	Dosis de Coagulante (mg/L)	Dosis de Ayudante (mg/L)	Turbidez Residual (FTU)
1	0	0	>> 3000
2	150	180	>> 3000
3	150	260	>> 3000
4	150	340	>> 3000
5	150	420	>> 3000
6	150	500	>> 3000

(*) >>: Sobre el rango máximo de medición

Tabla 3.30.: Ensayo de Coagulación del efluente

Coagulante	Sulfato de Aluminio comercial	Cloruro de Sodio (Sal)	Temperatura del agua	21 °C	pH	4,6
Volumen de muestra	1000 ml		Mezcla:	rápida: 1 min lenta: 9 min reposo: 5 min		
Jarra #	Dosis de Coagulante (mg/L)	Dosis Sal (mg/L)	Turbidez Residual (FTU)			
1	0	0	>> 3000			
2	150	5000	>> 3000			
3	150	5000	>> 3000			
4	150	5000	>> 3000			
5	150	5000	>> 3000			
6	150	5000	>> 3000			

(*) >>: Sobre el rango máximo de medición

Tabla 3.31.: Ensayo de Coagulación del efluente

Coagulante	Sulfato de Aluminio comercial	Cloruro de Sodio (Sal)	Temperatura del agua	21 °C	pH	4,6
Volumen de muestra	1000 ml		Mezcla:	rápida: 1 min lenta: 9 min		

		reposo: 5 min	
Jarra #	Dosis de Coagulante (mg/L)	Dosis de Sal (mg/L)	Turbidez Residual (FTU)
1	0	0	>> 3000
2	150	10000	>> 3000
3	150	10000	>> 3000
4	150	10000	>> 3000
5	150	10000	>> 3000
6	150	10000	>> 3000

(*) >>: Sobre el rango máximo de medición

3.5.2. Filtración

Tabla 3.32.: Ensayo de Filtración por gravedad

Tipo de Filtro	Cuantitativo	Temperatura del agua	21 °C	pH	4,6
Volumen de muestra	50 ml	Tiempo de Filtración	> 1 día	Tamaño de poro	2,5 µm
Filtro #	Turbidez Residual del filtrado (FTU)		Promedio		
1	894		671		
2	522				
3	596				

Tabla 3.33.: Ensayo de Filtración por gravedad

Tipo de Filtro	Cualitativo	Temperatura del agua	21 °C	pH	4,6
Volumen de muestra	50 ml	Tiempo de Filtración	1 hora	Tamaño de poro	25 µm
Filtro #	Turbidez Residual del filtrado (FTU)		Promedio		
1	2075		1925		
2	2142				
3	1557				

Tabla 3.34.: Ensayo de Filtración por gravedad

Tipo de Filtro	Fieltro	Temperatura del agua	21 °C	pH	4,6
Volumen de muestra	50 ml	Tiempo de Filtración	15 min	Tamaño de poro	≈ 50 µm (*)

Filtro #	Turbidez Residual del filtrado (FTU)	Promedio
1	3364	3732
2	3779	
3	4052	

(*) $\approx 50 \mu\text{m}$: Valor aproximado del tamaño de poro

Tabla 3.35.: Ensayo de Filtración al vacío Laboratorio UISEK

Tipo de Filtro	Fieltro	Temperatura del agua	21 °C	pH	4,6
Volumen de muestra	50 ml	Tiempo de Filtración	10 min	Tamaño de poro	$\approx 50 \mu\text{m}$ (*)
Filtro #	Turbidez Residual del filtrado (FTU)	Promedio			
1	3576	3360			
2	3455				
3	3048				

(*) $\approx 50 \mu\text{m}$: Valor aproximado del tamaño de poro

Tabla 3.36.: Ensayo de Filtración en serie y paralelo utilizando fieltro como medio filtrante en el laboratorio AIQUISA S.A.

Volumen de muestra	240 ml	Temperatura del agua	55°C	pH	4.6
Tipo de Filtro		Fieltro			
Tipo de ensayo	Sólidos Suspendidos Originales(mg/L)		Sólidos Suspendidos Retenidos(mg/L)		
Serie	35596		32813		
Paralelo	35596		33171		

(*) Valores promedio

Tabla 3.37.: Ensayo de filtración utilizando fieltro como medio filtrante en el laboratorio AIQUISA S.A.

Sólidos Totales Originales (mg/L)	38452	Volumen de muestra	50 ml
Sólidos	29556	Temperatura	55°C

Suspendidos Originales (mg/L)		del Agua	
# fieltro	Sólidos Suspendidos Retenidos (mg/L)	Promedio	
1	25306	25306	
2	25484	25484	
3	26430	26430	
4	25482	25482	
5	26022	26022	
6	26056	26056	
7	26614	26614	
8	25784	25784	
9	26696	26696	
10	19990	17791	
11	21356	19220	
12	22698	19966	

Tabla 3.38.: Ensayo de filtración utilizando fieltro como medio filtrante en el laboratorio UISEK.

# de Ensayo	Porcentaje de remoción Sólidos Suspendidos (%)
1	86
2	86
3	89
4	86
5	88
6	88
7	90
8	87
9	90
10	89
11	90
12	88
Promedio	88

3.7. Cálculos y Resultados

3.7.1. Cálculo de Caudal

Para el cálculo del caudal se utiliza la fórmula descrita a continuación y, el único dato que se necesario es la altura de la vena de agua en el vertedero triangular de 90°, el cual fue registrado en todos los muestreos y en cada muestra simple que se tomaba.

La formula de cálculo del caudal en un vertedero triangular de 90° es la siguiente:

Ecuación 3.6.1.1.

$$Q = 1.34 \times H^{2.48}$$

Hernández, A. 2da edición (2000). Manual de Diseño de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales. España Rugarte, S.L.

Donde:

Q = es el caudal del efluente en metros cúbicos por segundo

H = es la altura de la vena de agua sobre el vertedero de 90° en metros

Si la altura de la vena de agua sobre el vertedero es de 0.09 metros

$$Q = 1.34 \times (0.083)^{2.48}$$

$$Q = 0.0028\text{m}^3/\text{s}$$

$$Q = 0.0028\text{m}^3/\text{s} \times (1000\text{L}/1\text{m}^3)$$

$$Q = 2.8 \text{ L/s}$$

3.6.2. Cálculo de la concentración de Sólidos Totales

Este cálculo se realiza por diferencia de pesos, inicialmente se registra el peso del vaso de precipitación vacío y posteriormente se obtiene el peso del vaso de precipitación más el residuo; se resta el segundo valor menos el primer valor y se obtiene la cantidad de sólidos totales contenidos en la muestra analizada:

$$P_{ST} = P_{(V+M)} - P_{(V)}$$

Donde:

P_{ST} = Peso de los sólidos totales en gramos

$P_{(V+M)}$ = Peso del vaso de precipitación más residuo seco en gramos

$P_{(V)}$ = Peso del vaso de precipitación en gramos

Por lo tanto si:

$$P_{(V+M)} = 106.1883\text{g}$$

$$P_{(V)} = 99.1774\text{g}$$

Entonces realizando la operación:

$$P_{ST} = 7.0109\text{g}$$

Para obtener la concentración de sólidos totales en el efluente hay que transformar este peso a mg/l ó ppm, primero se transforma los gramos a miligramos:

$$P_{ST} = 7.0109\text{g} \times (1000\text{mg} / 1\text{g}) = 7010.9\text{mg}$$

Si se tomaron 150ml de muestra entonces por cada 150ml de efluente hay 7010.9mg de sólidos totales y se transforma los mililitros de muestra a litros:

$$C_{ST} = (P_{ST} / V_M) \times (1000\text{ml} / 1\text{L})$$

Donde:

V_M = Volumen de la muestra en mililitros

C_{ST} = Concentración de Sólidos Totales del Efluente ahora esta en mg/L ó ppm

Realizando las operaciones, se obtiene la concentración de sólidos totales en el efluente:

$$C_{ST} = 46739.33 \text{ mg/L ó ppm}$$

3.6.3. Cálculo de la concentración de Sólidos Suspendidos

Este cálculo se realiza también por diferencia de pesos; inicialmente se registra el peso del papel filtro y posteriormente se obtiene el peso del papel filtro más el filtrado (sólidos retenidos en el filtro); se resta el segundo valor menos el primer valor y se obtiene la cantidad de sólidos suspendidos contenidos en la muestra analizada:

$$P_{SS} = P_{(P+M)} - P_{(P)}$$

Donde:

P_{SS} = Peso de los sólidos suspendidos en gramos

$P_{(P+M)}$ = Peso del papel filtro más residuo seco en gramos

$P_{(P)}$ = Peso del papel filtro en gramos

Por lo tanto si:

$$P_{(P+M)} = 2.342g$$

$$P_{(P)} = 0.843g$$

Entonces realizando la operación:

$$P_{SS} = 1.499g$$

Para obtener la concentración de sólidos suspendidos en el efluente hay que transformar este peso a mg/l ó ppm, primero se transforma los gramos a miligramos:

$$P_{ST} = 1.499g \times (1000mg / 1g) = 1499mg$$

Si se tomaron 50ml de muestra entonces por cada 50ml de efluente hay 1499mg de sólidos totales y se transforma los mililitros de muestra a litros:

$$C_{ST} = (P_{SS} / V_M) \times (1000ml / 1L)$$

Donde:

V_M = Volumen de la muestra en mililitros

C_{SS} = Concentración de Sólidos Suspendedos del efluente ahora esta en mg/L
ó ppm

Realizando las operaciones, se obtiene la concentración de sólidos suspendidos en el efluente es de:

$$C_{SS} = 29980 \text{ mg/L ó ppm}$$

3.6.4. Cálculo del porcentaje Sólidos Suspendedos

Para este cálculo se debe restar la concentración de sólidos totales o de sólidos suspendidos después de haber pasado por el filtro (concentración final) y la concentración original de sólidos totales o de sólidos suspendidos.

Ejemplo se tiene los siguientes datos:

$$C_{SSo} = 35596 \text{ mg/L}$$

$$C_{SSf} = 32813 \text{ mg/L (ver tabla 3.36)}$$

$$\%SS_{\text{Retenidos}} = (C_{SSf} \times 100\%) / C_{SSo}$$

Donde:

$\%SS_{\text{Retenidos}}$ = Porcentaje de sólidos totales después de haber pasado el sistema de filtración expresado en % (porcentaje)

C_{SSo} = Concentración de sólidos totales original contenidos en el efluente en mg/L

C_{SSf} = Concentración de sólidos totales retenidos en el filtro en mg/L

Realizando la operación:

$$\%SS_{\text{Retenidos}} = 92\% \text{ (ver tabla 3.37.)}$$

3.6.5. Cálculo de la densidad

Para este cálculo se debe restar el peso del balón vacío menos el peso del balón más muestra y dividir para el volumen de muestra

Si se tiene los siguientes datos:

$$P_B = 32.6579\text{mg/L}$$

$$P_{(B+M)} = 83.5320\text{mg/L}$$

$$V = 50\text{ml}$$

$$\delta = (P_{(V+M)} - P_V) / V$$

Donde:

δ = Densidad

P_B = Peso del balón vacío en mg/L

$P_{(B+M)}$ = Peso de balón más muestra mg/L

V = Volumen de muestra en ml

Realizando la operación:

$$\delta = 1.02\text{g/ml}$$

3.6.6. Cálculo de la reducción de la carga contaminante de sólidos suspendidos

La reducción de la carga contaminante de sólidos suspendidos que llegará a las lagunas de oxidación una vez que se implemente el sistema de filtración es: (ver tabla)

Datos:

$$Q = 2.8 \text{ L/seg}$$

$$C_{SS} = 27504 \text{ mg/L}$$

$t_{op} = 24$ horas

% remoción = 88

Donde:

Q es caudal en L/seg

C_{SS} es concentración de sólidos suspendidos en mg/L

t_{op} es el tiempo de operación en horas

% remoción es la remoción de los sólidos suspendidos después del filtrado expresado en porcentaje.

1. Carga contaminante sin tratamiento (filtración) por día

Ecuación 3.6.6.1.

$$K_C = Q \times C_{SS}$$

www.acsmedioambiente.com

Donde:

K_C es la carga contaminante

Reemplazando los valores:

$$K_C = 2.8 \text{ L/seg} \times 27504 \text{ mg/L}$$

$$K_C = 77011 \text{ mg/seg}$$

Realizando la conversión de unidades:

$$K_C = 77011 \text{ mg/L} \times (1 \text{ Kg}/1 \times 10^6 \text{ mg}) \times (3600 \text{ seg}/1 \text{ hora}) \times (24 \text{ horas}/1 \text{ día})$$

$$K_C = \mathbf{6654 \text{ Kg / día (sólidos suspendidos)}}$$

2. Carga contaminante con tratamiento (filtración) por día

Ecuación 3.6.6.2.

$$K_{CC} = Q \times C_{SS}$$

www.acsmedioambiente.com

Donde:

K_{CC} es la carga contaminante

$$27504 \text{ mg/L} \times 0.88 = 24204 \text{ mg/L}$$

$$27504 - 24204 = 3300 \text{ mg/L}$$

$$K_{CC} = 2.8 \text{ L/seg} \times 3300 \text{ mg/L}$$

$$K_{CC} = 9240 \text{ mg/seg}$$

Realizando la conversión de unidades:

$$K_{CC} = 9240 \text{ mg/seg} \times (1\text{Kg}/1 \times 10^6 \text{mg}) \times (3600 \text{seg}/1 \text{hora}) \times (24 \text{horas}/1 \text{día})$$

$$K_{CC} = \mathbf{798 \text{ Kg / día (sólidos suspendidos)}}$$

Cantidad de "torta" obtenida en el proceso de filtración por día

$$T = K_C \times \% \text{ de remoción}$$

Donde:

T es la cantidad de torta obtenida por día

Reemplazando valores:

$$T = 6654 \text{ Kg (sólidos suspendidos)} \times 0.88$$

$$T = \mathbf{5855 \text{ Kg (sólidos suspendidos) o torta / día}}$$

3.6.7. Cálculos para la selección del filtro prensa

a) *Volumen de lodo por ciclo (V_L) (8 horas)*

$$Q = 10080 \text{ L/h (valor promedio ver tabla 3.7.)}$$

$$V_L = 10080 \text{ L/h} \times 1 \text{ galón}/3.785 \text{ L} \times 8 \text{ Horas}/1 \text{ ciclo}$$

$$V_L = \mathbf{21305 \text{ galones/ciclo}}$$

b) *Contenido de sólidos en el lodo (C) (fracción en peso)*

$$C = 27504 \text{ mg/L (valor promedio ver tabla \#)}$$

$$C = 27504 \text{ mg/L} / 1 \times 10^4$$

$$C = \mathbf{2.75 \% (peso)}$$

c) *Peso del agua (P) en libras en 1 galón de lodo*

$$\text{densidad del lodo} = 1.02 \text{ g/cm}^3$$

$$L = 1 \text{ cm}^3 / (3785 \text{ cm}^3 \times 1.02 \text{ g})$$

$$\mathbf{L = 38670.7 \text{ g (lodo)}}$$

Donde:

L es los gramos de lodo en el efluente líquido

$$S = (3860.7 \text{ g (lodo)} \times 2.75\%) / 100\%$$

$$\mathbf{S = 106.2 \text{ g (sólidos)}}$$

Donde:

S es los gramos de sólidos

$$P = 3860.7 \text{ g (lodo)} - 106.2 \text{ g (sólidos)}$$

$$P = 3754.5 \text{ g (agua)}$$

$$\mathbf{P = 8.27 \text{ lb (agua)}}$$

d) *Peso del lodo (P_L) en libras por pie³*

De acuerdo a la densidad del lodo:

$$P_L = (27544 \text{ cm}^3 \times 1.20 \text{ g}) / 1 \text{ cm}^3$$

$$P_L = 28095 \text{ g (lodo)}$$

$$\mathbf{P_L = 61 \text{ lb (lodo)}}$$

➤ La ecuación proporcionada por el fabricante ACS para calcular el tamaño del filtro prensa es:

$$\mathbf{T_{FP} = (V_L \times C \times P) / P_L}$$

$$T_{FP} = (21305 \text{ galones/ciclo} \times 0.0275 \times 8.27 \text{ lb/galón}) / 61 \text{ lb/pie}^3$$

$$\mathbf{T_{FP} = 78.3 \text{ pies}^3}$$

- De la siguiente tabla proporcionada por el fabricante ACS seleccionamos la capacidad (filtro prensa) pies³: **80 pies³**

Capacidad ft ³		0.5	0.6	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	10.0	15.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	80.0	100.0	150.0	200.0
AA	Area ft ²	10	14	21	35	42	67	88												
	Cámaras	3	4	6	9	13	19	25		Solo cierre manual					Peso de embarque 720 + 20 lbs por placa					
	Largo (L)	50	52	59	68	74	89	104												
A	Area ft ²			19	32	44	64	89	108	223										
	Cámaras			3	5	7	10	14	17	35					Peso de embarque 1,610 + 30 lbs por placa					
	Largo (L)			81	85	90	97	106	113	155										
B	Area ft ²					40	60	80	100	200	300	400								
	Cámaras					4	6	8	11	21	32	43			Peso de embarque 3,150 + 50 lbs por placa					
	Largo (L)					89	94	99	104	129	154	180								
C	Area ft ²										300	400	600							
	Cámaras	Peso de embarque 6,500 + 95 lbs por placa									20	27	41							
	Largo (L)										136	154	187							
D	Area ft ²											413	730	820	1000	1460	1640	2040		
	Cámaras	Peso de embarque 9,800 + 110 lbs por placa										17	25	34	42	50	67	84		
	Largo (L)										121	143	168	191	213	260	307			
E	Area ft ²														1047	1260	1690	2090	3170	
	Cámaras	Peso de embarque 11,500 + 150 lbs por placa													34	41	55	68	103	
	Largo (L)													189	206	238	275	360		
F	Area ft ²																1640	2110	3166	4220
	Cámaras	Peso de embarque 13,200 + 210 lbs por placa									Tamaño Optimo						41	52	78	104
	Largo (L)																217	246	315	384

Tabla 3.6.7.1.: Tabla de capacidad – área –longitud filtro prensa ACS

www.acsmedioambiente.com

A continuación se escoge la opción: **D**

Area filtrante: 1640 pies²

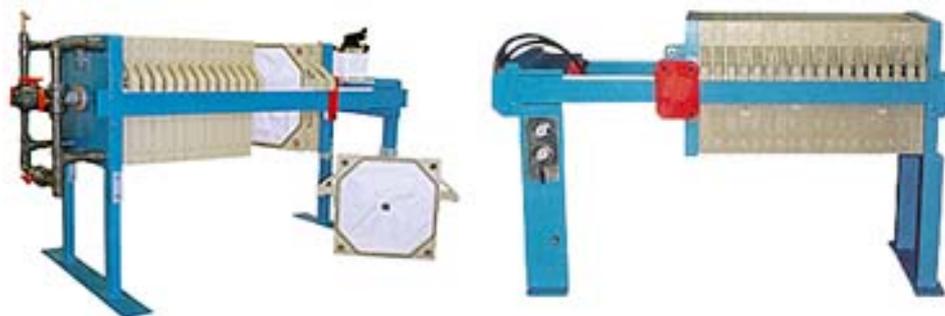
Número de cámaras: 67

Largo de la prensa: 260 pul



Fotografía 3.1.: Filtro prensa de placas ACS

www.acsmedioambiente.com



Fotografía 3.2.: Esquema de funcionamiento del filtro prensa ACS

www.acsmedioambiente.com

3.7. Resultados

A continuación se presenta los siguientes gráficos que ayudan a visualizar de una manera más fácil los datos experimentales de los muestreos y las pruebas de tratabilidad realizadas durante todo el estudio.

3.7.1. Resultados de la caracterización físico – química del efluente

Gráfico 3.1.: El Caudal registrado en el primer muestreo durante un período de 5 horas de descarga del efluente (ver tabla 3.1).

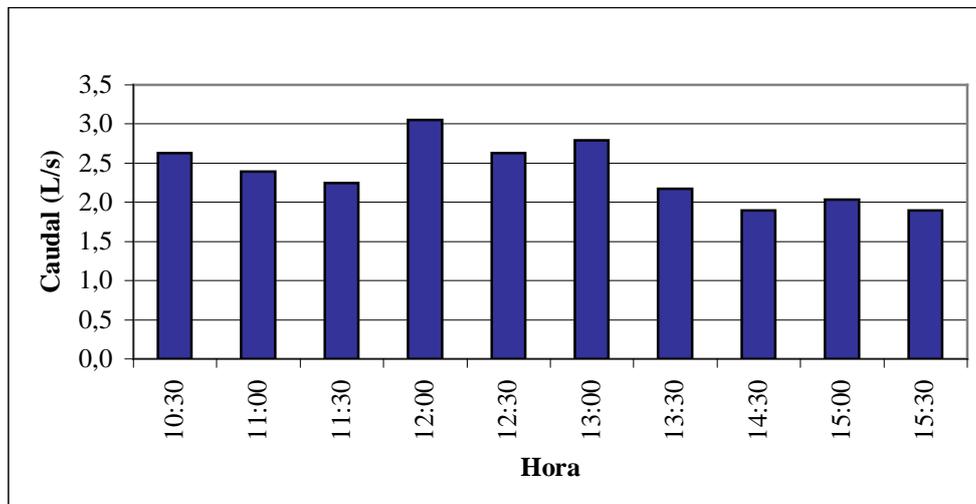


Gráfico 3.2.: El Caudal registrado en el segundo muestreo durante un período de 5 horas de descarga del efluente (ver tabla 3.3).

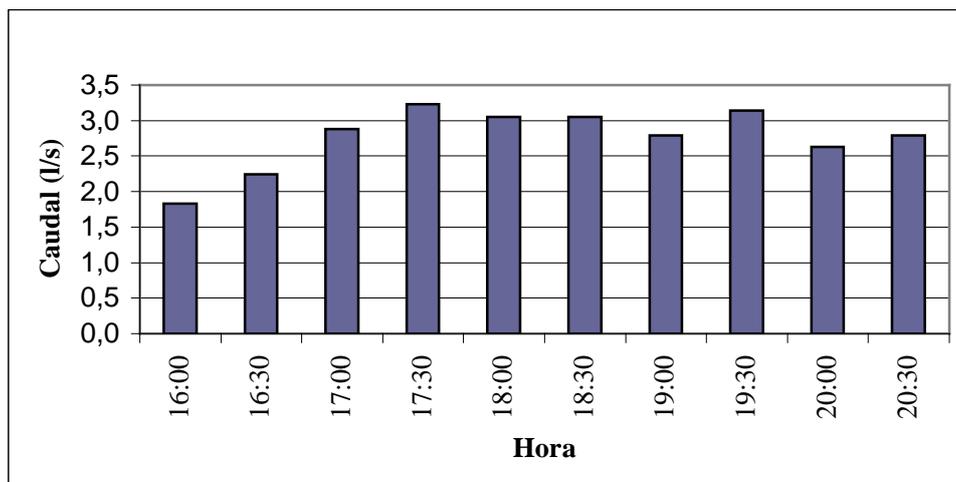


Gráfico 3.3.: El Caudal registrado en el tercer muestreo durante un período de 5 horas de descarga del efluente (ver tabla 3.5).

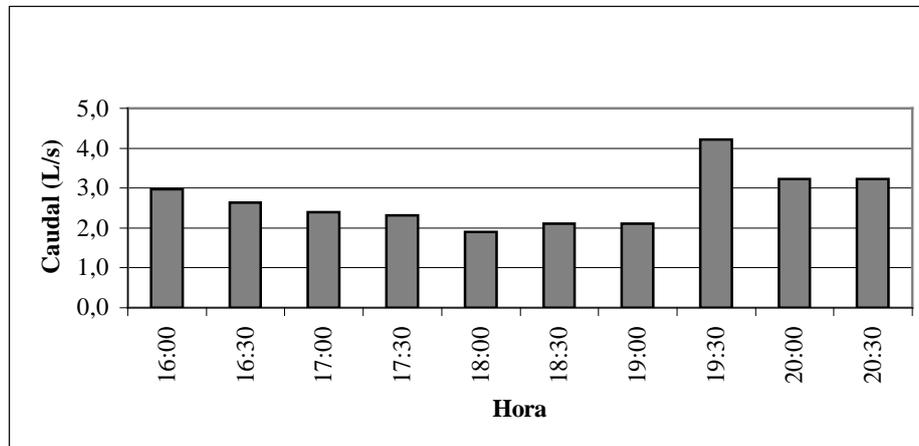


Gráfico 3.4.: El Caudal registrado en el cuarto muestreo durante un período de 5 horas de descarga del efluente (ver tabla 3.7).

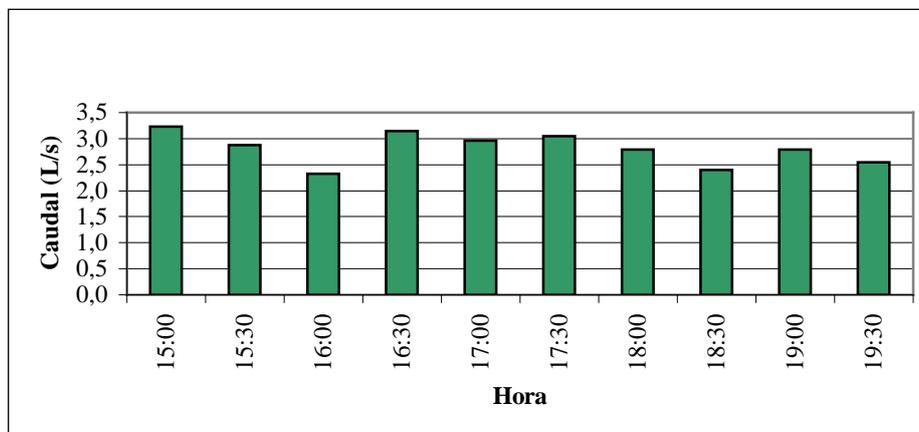


Gráfico 3.5.: Comparación entre el promedio de la concentración de Sólidos Totales (ST) a la entrada y la salida del sistema durante los cuatro muestreos (ver tabla 3.2, 3.4, 3.6 y 3.8).

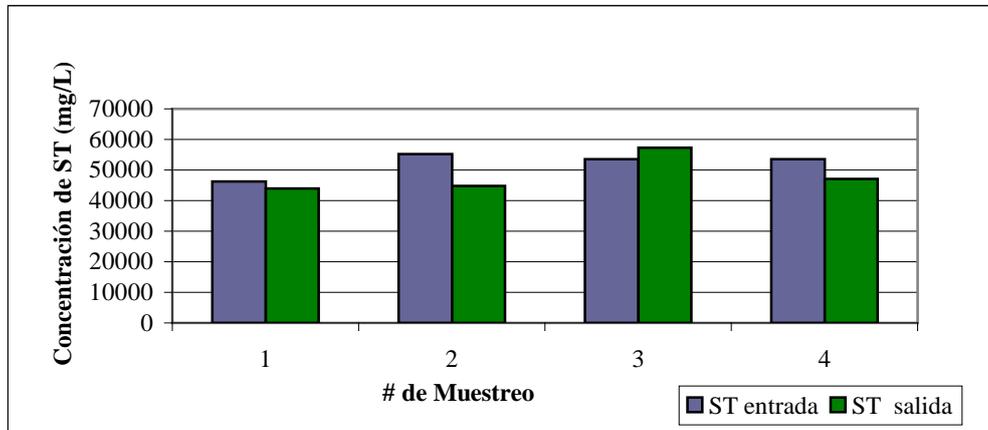


Gráfico 3.6.: Comparación entre el promedio de la concentración de Sólidos Suspendedos (SS) a la entrada y la salida del sistema durante los cuatro muestreos (ver tabla 3.2, 3.4, 3.6, 3.8).

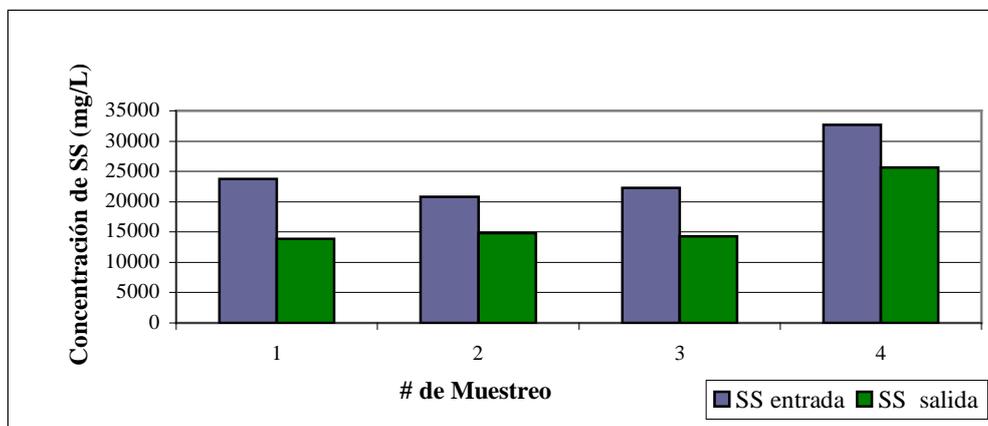


Grafico 3.7.: Sólidos Suspendidos retenidos en el Ensayo de filtración en serie y paralelo utilizando fieltro.

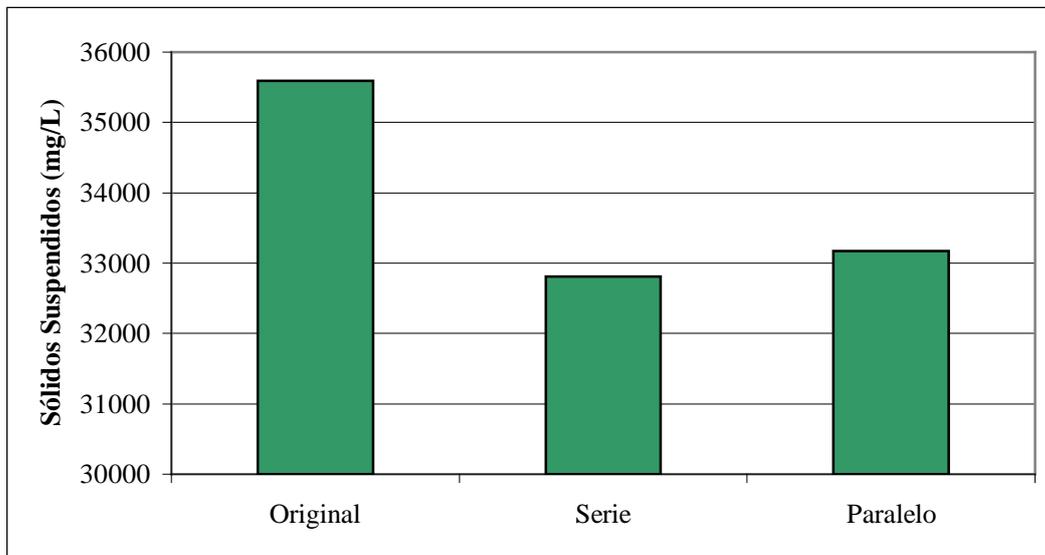
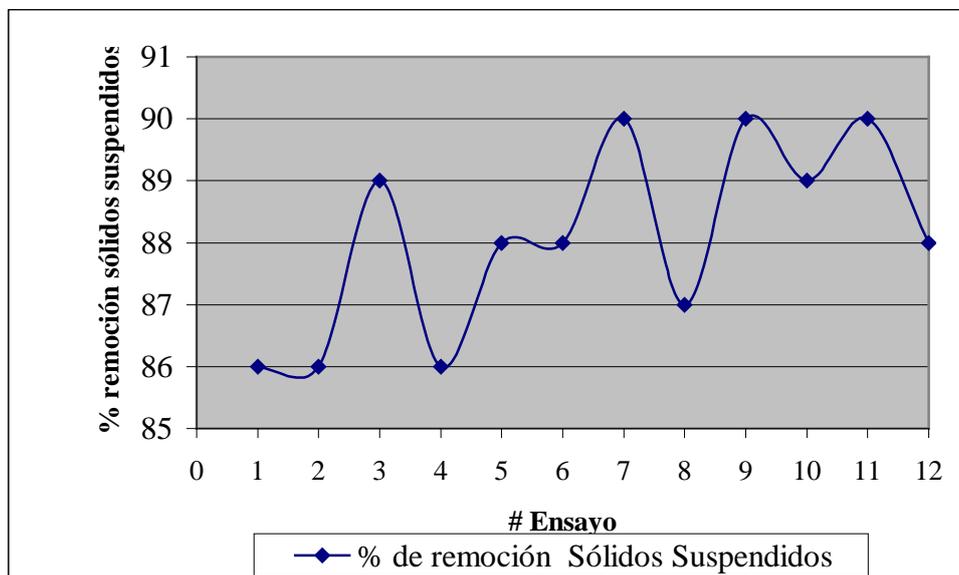


Grafico 3.8.: Porcentaje de remoción de Sólidos Suspendidos en el fieltro (filtración por gravedad)



CAPÍTULO IV:

DISCUSIÓN

- Los muestreos de esta investigación se realizaron durante la época lluviosa en los meses de enero a mayo del 2004, observando que existe influencia directa de la lluvia sobre el caudal de descarga del efluente, ya que el promedio es de 2.8 L/s y cuando llovía existía un significativo incremento del mismo a 4.2 L/s, lo cual debe ser tomado en cuenta para la implementación del sistema de tratamiento y también existe una disminución en las concentraciones de sólidos totales y sólidos suspendidos.
- La temperatura del efluente es alta con un promedio de entrada al sistema de 60°C y un promedio de salida de 57°C, apreciándose que por condiciones de temperatura ambiental y por el tiempo bajo de retención del sistema casi no se produce enfriamiento del efluente, permaneciendo casi constante la temperatura a la entrada como a la salida del sistema.
- Al igual que la temperatura el pH permanece relativamente constante tanto a la entrada como a la salida del sistema, el pH promedio es ácido (4.8) ya que el efluente esta constituido por ácidos grasos. Se ha tomado en cuenta este dato para el escoger los materiales a ser usados en el filtro prensa, dato contemplado al realizar las pruebas de tratabilidad como coagulación/floculación.
- El porcentaje de remoción de sólidos totales y sólidos suspendidos es bastante bajo (13 % y 22 % respectivamente) con el sistema actual, debido a que el tiempo de retención no es suficiente.
- Debido a la falta de mantenimiento del sistema como se puede observar en el tercer muestreo (tabla 3.6.), existe una mayor concentración de sólidos totales a la salida que a la entrada del sistema, ya que el desarenador y el sedimentador están colmatados de sólidos, ocasionando una disminución del volumen y por lo tanto disminuye el tiempo de retención.

- Como podemos apreciar en las tablas (3.2., 3.4., 3.6. y 3.8.) la concentración de sólidos totales, al igual que la concentración de sólidos suspendidos es bastante alta dificultando la coagulación / floculación.
- En los ensayos realizados de coagulación / floculación se probó en primera instancia, el sulfato de aluminio sin obtener ningún resultado positivo, a pesar de haber variado pH, temperatura, y las concentraciones del Coagulante, observando que definitivamente no funciona.
- Otro coagulante probado fue el cloruro férrico, al igual que el anterior se vario pH, temperatura, y la concentración, pero no se obtuvo ningún resultado es decir, no se observó la formación de flóculos.
- Se probaron varios tipos de ayudantes de coagulación o floculantes como polímeros orgánicos, polielectrolitos aniónicos, polielectrolitos catiónicos, y polielectrolitos no – iónicos; observando que con el polielectrolito no – iónico (Nalco 7530) si produjo la formación de flóculos. pero no sedimentaban debido a la falta de peso de los mismos.
- Además se observó que, en primera instancia, se formaban flóculos de mayor tamaño, es decir al comienzo de la agitación rápida, pero con el transcurso del tiempo y en la agitación lenta los flóculos que se habían formado tenían menor tamaño y al momento del reposo ya no sedimentaban, observando que los flóculos disminuían de tamaño se decidió cambiar los tiempos de agitación, llegando al punto de eliminar la agitación lenta y solamente se realizó la prueba de jarras, con agitación rápida y reposo; pero en este caso, la sedimentación de los flóculos era demasiado lenta, siendo poco práctico, debido a que el tiempo de retención sería elevado necesitándose un sedimentador grande.
- Se añadió cloruro de sodio (sal común), tratando de darles carga a las partículas utilizando sulfato de aluminio como coagulante, del mismo modo se realizaron las pruebas de jarras correspondientes, sin obtener ningún resultado positivo.

- Durante las pruebas de filtración se decidió comprobar la calidad del filtrado midiendo la turbidez residual, además cual de los filtros retenía más sólidos, en el menor tiempo.
- El filtro cuantitativo con un tamaño de poro de $2.5\mu\text{m}$ es el que más sólidos retiene pero es de más de un día el tiempo requerido, lo cual no es práctico.
- Con el filtro cualitativo con un tamaño de poro de $25\mu\text{m}$ el tiempo de filtración era de una hora para un mismo volumen de muestra, obviamente se retiene menos sólidos aumentando el valor de la turbidez residual.
- Finalmente se utilizó como filtro el “fieltro” el cual remueve una cantidad apreciable de sólidos en un tiempo de 15 minutos, lo cual es aceptable.
- Debido a que se desea disminuir la carga orgánica que llega a las lagunas de oxidación el fieltro es la mejor opción aún cuando el efluente mantiene una menor concentración de sólidos suspendidos removiéndose el 88% para que la degradación en las lagunas de oxidación sea más eficiente.
- Se probó también la filtración al vacío pero se presentó la limitación de que la bomba utilizada en el laboratorio de la Universidad SEK para este tipo de pruebas no tiene la suficiente potencia, ocasionando que no se pueda probar la filtración al vacío con los tres tipos de filtros. Sin embargo en el ensayo que se pudo completar no se observó mayor influencia del sistema de filtración al vacío en comparación al de gravedad y que de efectuarse la filtración al vacío se requeriría de una bomba con mayor potencia elevando los costos de operación.
- Debido a la limitación anteriormente descrita solo se realizó pruebas de filtración al vacío con el fieltro, el tiempo de filtrado disminuyó a 10 minutos de los 15 minutos registrados en la filtración por gravedad, y la turbidez residual disminuyó muy poco, comprobándose que no amerita el uso de vacío.

- Se experimentó dos opciones de filtración en serie y en paralelo utilizando como medio filtrante el fieltro, para observar la eficiencia de los dos sistemas sin observar mayor alteración en la remoción.

CAPÍTULO V:

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El sistema actual de remoción de los sólidos suspendidos de la planta extractora de aceite de palma africana AIQUISA, previo a la degradación de la materia orgánica en las lagunas de oxidación es ineficiente por su tamaño, ocasionando que la remoción de los sólidos sea demasiado baja y a su vez la carga orgánica que llega a las lagunas de oxidación sea alta para la capacidad que tiene.
- La materia prima de la extracción de aceite, es la fruta proveniente de la palma africana, por consiguiente los sólidos suspendidos existentes en los efluentes líquidos son de carácter orgánico, los cuales aportan a elevar los valores de la DBO₅.
- El circuito de agua lluvia esta conectado al sistema de aguas de proceso, por eso existe un incremento del caudal cuando llueve.
- En el sistema de tratamiento se ha quedado pequeño con respecto a la producción actual de la planta, ya que estaba diseñado para un menor caudal disminuyendo su eficiencia, necesitándose la implementación de un nuevo tratamiento para mejorar el efluente y aumentar la eficiencia de las lagunas de oxidación.
- De acuerdo a las pruebas de tratabilidad realizadas, coagulación / floculación no es adecuado para tratar este efluente, ya que las partículas en suspensión no se aglomeran para formar flóculos y sedimenten rápidamente, esto se debe a la ausencia de carga eléctrica de estas partículas en suspensión y a la gran cantidad de las mismas en el efluente, en consecuencia la coagulación / floculación no se pueda poner en práctica para estas aguas.

- La filtración es una buena opción para remover los sólidos suspendidos, ya que es un tratamiento con una operación bastante simple, con la filtración se obtiene un efluente clarificado facilitando la degradación de la materia orgánica residual en las lagunas de oxidación.
- Los lodos recuperados en la filtración tienen un uso agrícola por su alto contenido de nutrientes, por lo tanto se podría vender este lodo para amortizar la inversión y hacer que la filtración sea una actividad auto sustentable.
- Al implementar un tratamiento de remoción de los sólidos suspendidos se estará disminuyendo la carga orgánica que actualmente se está enviando al cuerpo de agua más cercano, disminuyendo así el impacto ambiental ocasionado por esta actividad industrial.
- La filtración en serie y en paralelo tienen casi la misma eficiencia de remoción de sólidos suspendidos por lo tanto la filtración en serie (ej: filtro prensa) por ser económicamente más rentable y menos complicado.
- Tanto la filtración por gravedad como la filtración al vacío arrojan resultados parecidos de turbidez residual y tiempo de filtración, por lo que en este caso es más apropiado la filtración por gravedad ya que no se está ocupando energía.
- El porcentaje de remoción promedio para los sólidos suspendidos, obtenido en el presente trabajo mediante filtración a través de un “fieltro” es de 88% con un máximo de 90%.
- Con la remoción de sólidos suspendidos conseguida a través de la filtración, la carga contaminante orgánica se reduce a 798 Kg/día, facilitando enormemente el trabajo de las lagunas de oxidación.
- La cantidad de “torta” obtenida después del proceso de filtración está en el orden de 5.8 TON/día.

5.2. Recomendaciones

- Se debe dar más atención a los tratamientos existentes en la planta y en general a la parte ambiental que en la actualidad presenta problemas.
- Se debe dar un mantenimiento periódico al sistema actual de tratamiento, mínimo una vez por mes para que no se colmate de sólidos el sedimentador y el desarenador evitando así disminución del volumen y el tiempo de retención.
- Todo el personal encargado del mantenimiento del sistema debe estar provisto de equipo de seguridad industrial y en general esta regla debe aplicarse a los obreros de la planta.
- Implementando el sistema de tratamiento sugerido: filtro prensa, se debe dar un mantenimiento periódico al filtro para que tenga la misma eficiencia a lo largo del tiempo.
- Se debe planificar correctamente la actividad de filtración en todas las etapas, para obtener el resultado deseado.
- Debido a la gran cantidad de lodo retenido se debe verificar los usos del mismo, para su posterior comercialización y que no se convierta en un subproducto más sin uso es decir un residuo, por lo que se recomienda el compostaje de donde se obtiene compost que es un nutriente para el suelo mejorando la estructura y ayudando a reducir la erosión además de aumentar la absorción de agua y nutrientes por parte de las plantas.
- Se recomienda separar las aguas lluvias de las aguas residuales para evitar que se contaminen además de no tener un aumento de caudal a ser tratado.

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFÍA

1. Base de datos: Aiquisa, 2003
2. Clair N. Sawyer, Perry L. McCarty, Gene F. Parkin, 4ta edición (2001). Química para la Ingeniería Ambiental. Bogotá-Colombia: MacGraww-Hill.
3. Correal, R. 1era edición (2002). Tratamiento y Postratamiento de Aguas Residuales, Boyacá-Colombia: Uniboyacá.
4. Glynn y Gary. 2da edición (1999). Ingeniería Ambiental, México: Prentice Hall.
5. Hernández, A. 2da edición (2000). Manual de Diseño de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales. España Rugarte, S.L.
6. Kiel, G. (1999). Ingeniería Ambiental. Fundamentos, Entornos, Tecnologías y Sistemas de Gestión. Volúmenes I, II y III. Madrid-España. McGraw-Hill.
7. Metcalf, E. 2da edición (1986). Ingeniería Sanitaria. Tratamiento, Evaluación y Reutilización de las Aguas Residuales. España: Editorial Labor S.A.
8. Perry, R y Green, D. 7ma edición (2001). Manual del Ingeniero Químico. Vol III. Madrid-España: McGraw-Hill.
9. Romero, J. 1era edición (2000). Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y Príncios de Diseño, Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
10. Sainz, R y Ribas, J. 1era edición (1999). Ingeniería Ambiental, Contaminación y Tratamientos, Bogota-Colombia.
11. Valencia, J. 3era edición (2000). Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Tomo I y II. Bogota-Colombia: McGraw-Hill.
12. www.acsmedioambiente.com
13. www.aguamarket.com
14. www.ancupa.com
15. www.armfield.co.uk/esp_ft14_datasheet.html
16. www.ecociencia.org
17. www.fedepalma.com
18. www.infoagro.com
19. www.mag.go.cr/rev_agr/v27n01_007.pdf
20. www.sedapal.com.pe/bvs/coagulacion-floculacion.pdf
21. www.taninos.tripos.com