



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ALTERNATIVA DE SULFATO DE CALCIO DI
HIDRATADO (Ca SO₄.2H₂O) EN EL TRATAMIENTO
PRIMARIO DE AGUAS RESIDUALES PARA LA
CIUDAD DE QUERÉTARO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

ALEJANDRA HERNÁNDEZ GONZÁLEZ

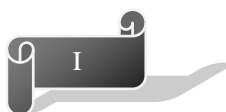
RESUMEN

En México a partir de la década de los setentas, ha aumentado el número de acuíferos sobre explotados, en el año de 1975 eran 32 acuíferos, en 1985 eran 80 y al 2008 se reportaron 101 (CNA, 2008). De los acuíferos sobreexplotados el 58% del agua es subterránea para todos los usos (CNA, 2008). En el estado de Querétaro, los acuíferos sobreexplotados, se localizan principalmente en Chichimequillas, Querétaro, San Juan del Rio y Tequisquiapan. En el estado el abatimiento de los acuíferos es de 1 a 3 metros por año y en general existe un déficit de alrededor de 133 millones de metros cúbicos. Tanto en el país como en el estado de Querétaro, el principal uso del agua es en la agricultura, donde se utiliza aproximadamente el 80%.

Es importante y urgente dejar de sobreexplotar nuestros mantos acuíferos y dejar de contaminar nuestros ríos y mares, para esto necesitamos utilizar lo más posible nuestras aguas residuales, sin que estas dañen nuestra salud y economía.

El Sulfato de Calcio Di-hidratado ($\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), es un compuesto divalente, que ha sido utilizado profusamente en construcción, ejemplo: como pasta para guarnecidos, enlucidos y revoques; como pasta de agarre y de juntas, es utilizado para obtener estucados y en la preparación de superficies de soporte para la pintura artística al fresco, como prefabricado, en paneles de yeso (Dry Wall o Sheet rock) para tabiques, y escayolados para techos. Se usa como aislante térmico, pues el yeso es mal conductor del calor y la electricidad. Para confeccionar moldes de dentaduras, en Odontología. Para usos quirúrgicos en forma de férula para inmovilizar un hueso y facilitar la regeneración ósea en una fractura. En los moldes utilizados para preparación y reproducción de esculturas. En la elaboración de tizas para escritura. En la fabricación de cemento y en la remediación de suelos, ósea, la eliminación de elementos contaminantes de los mismos, especialmente metales pesados.

Hasta la fecha no sea encontrado publicación alguna que hable sobre el uso del Sulfato de Calcio Di-hidratado, como regenerador de aguas; esto, tal vez, se deba a la falta de credibilidad de este producto, el pensar que el calcio tiene una desventaja por ser divalente o simplemente no nos atrevíamos como ingenieros a explorarlo mas allá, pero me atrevo a decir que las ventajas que este aporta son mayores con respecto a lo que pudiese pensarse.



SUMMARY

In Mexico since the late seventies, has increased the number of overexploited aquifers in the year 1975 were 32 aquifers in 1985 were 80 and 2008, reported 101 (CNA, 2008). Of overexploited aquifers, 58% is underground water for all uses (CNA, 2008). In the state of Querétaro, overexploited aquifers are mostly located in Chichimequillas, Querétaro, San Juan del Rio and Tequisquiapan. Abatement in the state of the aquifers is from 1 to 3 meters per year and in general there is a deficit of about 133 million cubic meters. Both at home and in the state of Querétaro, the main use of water in agriculture, which it use about 80%.

It is important and urgent to stop over-exploiting our groundwater and stop polluting our rivers and seas, for this we need to use as much as possible our wastewater, but such damage our health and economy.

Calcium Sulfate Di-hydrate ($\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) is a bivalent compound, which has been used widely in construction, eg as a paste to trim, plaster and plaster, as gripping and pasta together, is used to obtain coated and in the preparation of support surfaces for painting in fresco, as prefabricated Drywall (Dry Wall or Sheet rock) for walls and ceiling plaster. It is used as a thermal insulator, as the cast is a poor conductor of heat and electricity. The gypsum is used to make molds of teeth in dentistry. Also it is used for surgical applications as a bone splint to immobilize and facilitate bone regeneration in a fracture, in the mold used for preparation and reproduction of sculptures. The same form is used to in the development of chalk for writing. Also is to make in the manufacture of gypsum and soil remediation, bone, removing contaminants from them, especially heavy metals.

So far not found any publication that speaks about the use of Calcium Sulfate Di-hydrated, as water regenerator, this perhaps is due to the lack of credibility of this product, thinking that calcium has a disadvantage divalent or simply because we did not dare as engineers to explore further, but I dare say that the benefits this brings are greater with respect to what might be thought.



AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas especiales a las que quiero agradecer su apoyo, ánimo, amistad y compañía en las diferentes etapas de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en el corazón. Sin importar en donde estén y si alguna vez llegan a leer estas dedicatorias, quiero darles las gracias por todo lo que me han brindado, por todas sus bendiciones y por formar parte de mi.

Mamá, gracias por todo tu esfuerzo, tu apoyo, por la confianza que has depositado en mí y sobre todo gracias por tu amor que siempre me has brindado, creo que no hay necesidad de decirlo que eres y serás la mejor mama del mundo.

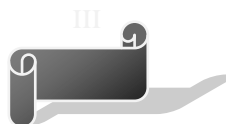
Papá, éste logro que he obtenido lo quiero compartir contigo, gracias por creer en mí, por tu esfuerzo, trabajo y dedicación para con nosotros tu familia, por tus consejos y tus regaños, gracias por ser mi papá. Quiero que sepas que ocupas un lugar muy especial en mi corazón.

A mis hermanos *Pepe, Carmelita, Ángeles, Moi, Pacualin*, con cada uno he vivido cosas muy especiales, gracias por esos momentos que han compartido conmigo, por su tiempo, consejos, reclamos, peleas, por esos oídos que me han escuchado y soportado☺ y sobre todo por su cariño, los amo.

Diana tampoco te quedas atrás, gracias por el hermoso sobrino que tengo *Hectorin* y por la gran alegría de saber que pronto volveré hacer tía de un hermoso bebe, los amo pequeños.

Víctor y Zabdiel, gracias por ser mis incondicionales, en verdad son muy especiales para mí, los amo y adoro.

A todos mis amigos sin excluir a nadie, pero en especial a *Eli, Teresita, Lucero, Nalle, Cristofer, Toñito, Rosario, Gelacio, Pame, Naara, Ruben, Gilberto* mil gracias por todos los momentos que hemos pasado juntos y porque han estado con migo siempre aunque sea sólo para dar lata y molestar☺. Sólo puedo decir que son geniales.



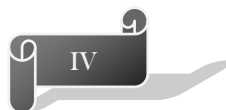
A mi asesora *María Concepción*, gracias por creer en mí, por su paciencia, por la amistad que logramos formar en este tiempo de trabajo, por sus consejos.

A todos mis profes no solo de la carrera sino de toda la vida, mil gracias porque de alguna manera forman parte de lo que ahora soy.

A mis asesores Felipe Ortiz, Ventura Jr Eusebio y Alfonso Gutiérrez, les agradezco su tiempo a la revisión de esta tesis.

Y al más especial de todos, a ti Señor porque hiciste realidad este sueño, por todo el amor con el que me rodeas y porque me tienes en tus manos. Gracias mil gracias Dios, esta tesis es para ti.

Alejandra



DEDICATORIAS

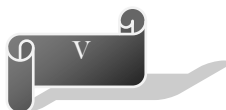
Primeramente, le dedico a Dios todo poderoso este trabajo, por ser mi guía espiritual que me conduce siempre hacia el camino del bien y del éxito. Y por darme la conformidad de tener a mis padres con vida y mucha salud solo él sabe lo importante que son para mí. Al igual que todas esas personas que me apoyaron y confiaron en mí. Gracias Dios.

A mis padres, María Antonia González y Pascual Hernández, por darme la fuerza para seguir caminando y lograr alcanzar esta meta anhelada, que hoy gracias a Dios y en conjunto con ustedes lo he logrado. Dios los bendiga, les de salud y mucha vida para poder retribuirles un poco de lo mucho que me han dado. Los amo para ustedes este logro y todos los que me faltan por alcanzar, este es solo el comienzo de una vida llena de éxitos para ustedes. “El obtener superación hoy es el resultado de tener excelentes padres y eso son ustedes”, los amo mucho.

A mis hermanos, José Guadalupe, María del Carmen, y en especial a María de los Ángeles, Moisés y Pascual Antonio, para que tengan en cuenta que todo lo que nos proponemos en la vida lo podemos lograr si trabajamos fuerte y firmemente, sigan adelante, para que mis éxitos hoy sean los suyos mañana y siempre.

A mi Sobrino Héctor y al bebe que viene en camino, por ser lo más inocentes, amoroso y bello que tengo, por ustedes quiero seguir mejorando y aunque hoy no conozcan lo que estoy dedicándoles, se que algún día lo conocerán y fundaran mis palabras hoy, parte de sus éxitos en un mañana. Gracias por existir en mi vida.

Alejandra



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.....	10
Tabla 2.....	15
Tabla 3.....	22
Tabla 4.....	30
Tabla 5.....	35
Tabla 6.....	36
Tabla 7.....	45
Tabla 8.....	52
Tabla 9.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.....	13
---------------	----

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imágenes 1.....	37
Imágenes 2.....	37
Imágenes 3.....	37
Imágenes 4.....	38
Imágenes 5.....	39
Imágenes 6.....	40
Imágenes 7.....	42
Imágenes 8.....	42

ÍNDICE DE GRAFICAS

Grafica 1.....	46
Grafica 2.....	47
Grafica 3.....	48
Grafica 4.....	49
Grafica 5.....	49
Grafica 6.....	50
Grafica 7.....	50
Grafica 8.....	51
Grafica 9.....	51

ÍNDICE.

RESUMEN.....	I
SUMMARY.....	II
AGRADECIMIENTO.....	III
DEDICATORIA.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE GRAFICAS.....	VII
ÍNDICE GENERAL.....	VIII
PRÓLOGO.....	XI
CAPÍTULO I	
Introducción.....	02
1.1 Antecedentes.....	03
1.2 Justificación.....	05
1.3 Descripción del problema.....	06
1.3.1 Situación de los Recursos Hídricos en México.....	07
1.3.2 Contaminación del Agua.....	08
1.3.3 Principales fuentes de contaminación.....	09
CAPÍTULO II	
Revisión de Literatura.....	11
2.1 Definición del Agua residual y sus clasificaciones.....	12
2.1.1 Características Bacteriológicas.....	14
2.2 Sistemas de tratamiento de las aguas residuales.....	16
2.3 Tipos de Tratamiento.....	16
2.3.1 Pre tratamiento de las Aguas Residuales.....	17
2.3.2 Tratamiento de las Aguas Residuales.....	17
2.3.3 Tratamiento secundario convencional.....	17

2.3.3.1 Control y Eliminación de Nutrientes.....	17
2.3.4 Tratamiento terciario.....	18
2.4 Fundamentos teóricos de los procesos de Coagulación-Floculación.....	18
2.4.1 Generalidades.....	18
2.4.2 Caracterización de los coloides.....	19
2.4.3 Proceso de Coagulación-Floculación.....	21
2.4.4 Factores que intervienen en el proceso de Coagulación-Floculación.....	22
2.4.5 Coagulantes más utilizados	24
2.5 Características de los parámetros principales de medición a las aguas.....	25
2.5.1 Potencial de Hidrógeno	25
2.5.2 Conductividad Eléctrica	25
2.5.3 Turbidez	26
2.5.4 Color verdadero y aparente	26
2.5.5 Temperatura	27
2.5.6 Sólidos Totales en un agua residual.....	28
2.5.7 Prueba de jarras.....	29

CAPÍTULO III

Hipótesis y Objetivos.....	31
3.1 Hipótesis.....	32
3.2 Objetivos.....	32
3.2.1 Objetivo General.....	32
3.2.2 Objetivos Particulares.....	32

CAPÍTULO IV

Metodología y Materiales.....	33
4.1 Descripción del Sitio de Muestreo.....	34

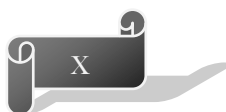
4.2	Toma de Muestra y su caracterización.....	34
4.3	Análisis de las muestras.....	36
4.3.1.	Determinación del Potencial de Hidrogeno.....	36
4.3.2.	Determinación de la Conductividad Eléctrica.....	37
4.3.3.	Determinación de la Turbidez.....	38
4.3.4.	Determinación del Color Verdadero y Aparente.....	39
4.3.5.	Medición de la temperatura.....	40
4.3.6.	Cuantificación de los SST (Sólidos Suspendidos Totales).....	40
4.3.6.1	Sólidos sedimentables (cono imhoff).....	41
4.4	Prueba de Jarras.....	42
4.4.1	Procedimiento para la realización de la prueba de jarras.....	42

CAPÍTULO V

Resultados y Discusión.....	44
5.1 Resultados de la caracterización del agua cruda	45
5.2 Resultados obtenidos después de aplicar la Prueba de Jarras.....	46
5.3 Valores máximos y mínimos obtenidos con respecto a la media	50
5.4 Porcentajes de remoción.....	52
5.5 Comportamiento de la variable turbidez con respecto al tiempo.....	53

CAPÍTULO VI

Conclusiones.....	58
6.1 Conclusiones.....	59
Bibliografía.....	61
Anexos.....	64



PRÓLOGO

La Universidad Autónoma de Querétaro es una institución que ha venido aportando el principal requerimiento para la ciudadanía en sus diversas facultades y carreras, este elemento tan importante son jóvenes estudiantes que buscan, de una manera tanto personal como profesional, poder superarse en la vida.

La estadía en la Universidad Autónoma de Querétaro, en particular como parte de la facultad de Ingeniería y en lo que corresponde a la carrera de Ingeniería Civil tiene una duración de cuatro años, divididos en ocho semestres. En cuanto a la metodología de aprendizaje está compuesto por el 42% de prácticas y un 58% de enseñanza teórica. Conformado de la siguiente manera, el 55% como parte de las ciencias de Ingeniería, el 25% son ciencias matemáticas, el 11% son ciencias sociales y humanidades y el 8% son ciencias de otros cursos relacionados con la carrera, permitiendo así a los egresados tener un nivel de desarrollo profesional, con el propósito de que se logre una mejor incorporación, tanto en equipo, y de una forma competitiva dentro del campo laboral.

En la estadía el alumno y futuro profesionista elabora un proyecto junto con un asesor ya sea trabajo de tesis, tesina, reporte de algún proyecto aceptable elaborado y con participación durante su residencia profesional, apuntes de maestro entre otros. El cual, al ser desarrollado satisfactoriamente, permite al alumno presentar su examen de titulación.

Es precisamente, en la modalidad por trabajo de tesis, donde se desarrolla el presente proyecto, mismo que me permitirá obtener el título de Ingeniero Civil.

A continuación, se presenta el proyecto que lleva por nombre: *Alternativa de Sulfato de Calcio Di-Hidratado ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) en el Tratamiento Primario de Aguas Residuales para la Ciudad de Querétaro.*

Proyecto en el que se plantea, la opción de poder ofrecer una alternativa al uso del $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, como coagulante-floculante-sedimentación, en lo que corresponde a la regeneración de las aguas residuales. Teniendo como objetivo, plantear los beneficios que el $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ aporta en el tratamiento primario y comparado con el uso tradicional del

sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$), el cual es el más usado hoy en día en las plantas de tratamiento en las que se aplica el procedimiento fisicoquímico de coagulación-floculación-sedimentación.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN



INTRODUCCIÓN

El agua como recurso natural, es uno de los compuestos más abundantes de la naturaleza y cubre aproximadamente las tres cuartas partes de la superficie de la tierra (Berghuber, 2009). Sin embargo, en contra de lo que pudiera parecer, diversos factores limitan la disponibilidad de agua para uso humano. Más del 97% del agua total del planeta se encuentra en los océanos y otras masas salinas, y no están disponibles para casi ningún propósito. Del 3% restante, por encima del 2% se encuentra en estado sólido (hielo), resultando prácticamente inaccesible. Por tanto, se puede decir que para las actividades del hombre, sólo resta un 0.62 % que se encuentra en lagos, ríos y aguas subterráneas (Toledo, 2002). La cantidad de agua disponible es ciertamente escasa, aunque mayor problema es aún su distribución irregular en el planeta así como la contaminación que presentan actualmente (CNA, 2010).

El uso de los recursos naturales provoca un efecto sobre los ecosistemas de donde se extraen y en los ecosistemas en donde se utilizan (Nebel y Wright, 1999). El caso del agua es uno de los ejemplos más claros: un mayor suministro de agua significa una mayor descarga de aguas residuales. Las aguas residuales, como tales, son materiales derivados de residuos domésticos o de procesos industriales, los cuales por razones de salud pública y por consideraciones de recreación económica y estética, no pueden desecharse vertiéndolas sin tratamiento en lagos o corrientes convencionales (Arboleda, 2000). Los materiales inorgánicos como la arcilla, sedimentos y otros residuos deben de eliminarse por métodos mecánicos, químicos y biológicos, ya que el posterior vertido de aguas contaminadas afecta directamente la salud de los ecosistemas y de la población humana en consecuencia (Manahan, 2007). El tratamiento de las aguas tiene como objetivo provocar y acelerar, los cambios físicos, químicos y biológicos que conviertan el agua residual en agua usable para diferentes propósitos (Romero, 2005). Las normas que regulan los límites permisibles de contaminantes son diferentes dependiendo del uso y disposición final de las aguas residuales.

Dentro del tratamiento de aguas residuales, la coagulación floculación constituye una fase importante, como parte del proceso de tratamiento integral. Sin una floculación efectiva, el

resto del proceso se verá mermado en su eficiencia, lo que obliga a una cuidadosa atención de esta fase. La floculación inmediata a una coagulación química del agua tiene por objetivo la remoción de turbiedad orgánica e inorgánica, color real y aparente, bacterias, algas y otros organismos patógenos y sustancias productoras de olores y sabores (Andía, 2000; Tebbutt, 1999).

Tradicionalmente se ha utilizado el sulfato de aluminio o alumbre para el tratamiento de las aguas residuales (DELHAIZE, 1996) haciendo que se alteren las cargas electrostáticas de las partículas suspendidas en el agua. Esta alteración de las cargas hace que las partículas suspendidas se atraigan entre sí, o se coagulen en grumos llamados flóculos. Por agitación, los flóculos se unen formando partículas más pesadas, las cuales pueden sedimentar y separarse del agua en forma de lodos (Weber, 2003; Andía, 2000).

En la actualidad, muchas de las aguas son dispuestas sin tratamiento o tratadas con sulfato de aluminio en cuerpos de agua o usadas para riego agrícola o de áreas verdes (Seoanes, 2005). El uso de sulfato de aluminio, aparte de ser un producto que no se produce en México, representa un problema potencial de contaminación en aguas y suelos por el cambio en las propiedades físicas de estos dos recursos, lo cual puede afectar el crecimiento de plantas y animales. Los cambios evidentes son en el pH, Conductividad Eléctrica y contenido de aluminio en las aguas y lodos (Arboleda, 2000).

En este trabajo se pretende llegar a demostrar que el Sulfato de Calcio Di-Hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), puede lograr promover la coagulación-floculación, alcanzando resultados satisfactorios en los parámetros de respuesta que se establezcan previamente en función al rehusó que se le dé a el agua residual tratada.

1.1 Antecedentes

La contaminación del agua se relaciona con el grado de impurificación, que puede originar efectos adversos a la salud (Jiménez, 2001). Se considera que el agua está contaminada cuando ya no puede utilizarse para un uso destinado en su estado natural o cuando se ven alteradas sus propiedades químicas, físicas, biológicas y/o su composición (Manahan, 2007; Ramalho, 1999). La calidad del agua y el tratamiento del agua residual son de vital

importancia para el cuidado de la salud humana y el equilibrio de los ecosistemas (Aguilar, 2009). El tratamiento primario de aguas residuales incluye el proceso de Coagulación-Floculación, cuyo principal objetivo es la reducción de los sólidos en suspensión del agua residual, dentro de los cuales pueden distinguirse: los sólidos sedimentables, los sólidos flotantes y los sólidos coloidales (Romero, 1999; Tebbutt, 1999). Un coloide es una partícula diminuta que cuenta con una carga eléctrica que es esencial en la estabilidad de la dispersión en la que se encuentra, y con un diámetro que oscila entre 10 nm. y 10 micrómetros (Cabrera et al., 2009; Andía, 2000; Arboleda, 1992). Las partículas coloidales pueden ser inducidas a precipitar por el agregado de un compuesto químico que pueda llegar a neutralizar las cargas eléctricas de las partículas en suspensión, eliminando las fuerzas de repulsión (Yang, 2004; Williams, 1986).

El Sulfato de Aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), es uno de los compuestos, más usado como coagulante-floculante en la actualidad (Tebbutt, 1999; Nalco, 2000; Metcalf & Eddy, 2000). El aluminio no sólo es neurotóxico por ingestión sino que además, a finales de los años noventa se determinó la presencia de un efecto sinérgico debido a la presencia de flúor y aluminio, en los cuerpos de agua (Tzamaloukas, 1990). El exceso de salinidad en el agua se incrementa al utilizar el uso de sulfato de aluminio, por lo que no es recomendable su aplicación a aguas con sólidos totales suspendidos por encima de 1500 mg/l ya que se dificulta la precipitación (Delhaize, 1995). Además el Aluminio es tóxico para los peces en aguas acidificadas a partir de concentraciones de 0.1mg/L (Bruton, 1980). Actualmente, se considera que el cerebro constituye un sitio importante de acumulación del aluminio independientemente de la vía por la cual ingrese al organismo (Meshitsuka, 2002).

El Sulfato de Calcio Di-Hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), conocido comúnmente como yeso natural o agrícola, puede ser una alternativa al uso del sulfato de aluminio, sobre todo por los efectos positivos en el PH del agua tratada y de los lodos residuales, así como el contenido de Calcio, Ca^{2+} , un ion que promueve la floculación y sirve de nutriente para las plantas, además de ser completamente inocuo para la salud humana. Hasta el momento no existe publicación alguna sobre el uso del Sulfato de Calcio Di-Hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) como coagulante, en lo que corresponde al tratamiento primario de las aguas residuales.

1.2 Justificación

La población mundial a través de los años y el crecimiento demográfico ha aumentado de manera tal que hace tan solo 40 años había la mitad de la población actual. Según datos de la Organización de las Naciones Unidas, se estima que la población mundial actual es de 6,800 millones de habitantes, y se espera que rebase los 9,000 millones de habitantes para el año 2050 (ONU, 2009).

El gran desarrollo de la sociedad en los últimos años ha llevado consigo una serie de ventajas indiscutibles (Muñoz y González, 2000). El nivel y calidad de vida han aumentado considerablemente, estableciéndose una sociedad más consumista, lo que ha implicado una mayor necesidad de ofrecer, por parte de las diferentes industrias nuevos productos (Manahan, 2007; Nebel y Wright, 1999). Por otro lado, la evolución urbana y demográfica constituye una de las principales preocupaciones de la actualidad (Schulz y Okun, 1990). Tal crecimiento urbano desmesurado ha traído consigo grandes problemas ambientales y de salud, la contaminación del aire, del suelo, la deforestación y el agotamiento y contaminación del recurso del agua (Jiménez, 2001).

La escasez de recursos naturales se ve agravada por la demanda constante y creciente de servicios que se deben suministrar a la población, así como el riesgo de contaminación a gran escala de sólidos y desechos líquidos que generan los mismos (INE, 2008). Uno de estos recursos de mayor valor es el agua, debido a la estrecha relación que guarda con los procesos vitales y con el desarrollo de toda actividad humana (Manahan, 2007). Las condiciones geográficas y climáticas de la República Mexicana dan origen a grandes irregularidades en su disponibilidad, la cual depende de la dinámica del ciclo hidrológico (CNA, 2007).

Una de las actividades que más contaminan al agua es la agricultura, sobre todo por el uso de fertilizantes y pesticidas que contaminan el suelo y en consecuencia, la infiltración de agua contamina los mantos acuíferos con sustancias dañinas tales como los nitratos (Manahan, 2007; Pérez, 2006; FAO, 1993). Otra de las fuentes de contaminación son las descargas de las aguas residuales que se generan por las diferentes actividades humanas (Nebel y Wright, 1999; Romero, 1999). El grado de contaminación depende de los

contaminantes que contenga y del tratamiento al que haya sido sometida antes de ponerse en contacto con las aguas superficiales (Jiménez, 2001; Ramalho, 1999).

El problema de contaminación del agua y el deterioro de su calidad ha sido la causa de enfermedades infecciosas intestinales. En el año 2007, la Secretaria de Salud registró la muerte de 1465 niños menores de 4 años de edad, lo cual fue considerado como la tercera causa de muerte en niños (INEGI, 2009). Esto hace a la población vulnerable ante el gran problema de contaminación y desabasto del agua potable (Ramalho, 1999). Por lo tanto es necesaria la implementación de técnicas de tratamiento de agua residual que mejoren su calidad para su re-uso, de acuerdo a lo establecido en las Normas Mexicanas. Estas técnicas deben de generar aguas tratadas con propiedades dentro de la normatividad y que no represente un riesgo para el ambiente ni para la salud humana (Manahan, 2007). Por lo tanto es necesario proponer alternativas, sobre todo en el tratamiento primario, de tal manera que se pueda sustituir el uso tradicional del Sulfato de Aluminio, y así evitar las consecuencias negativas que este químico implica.

1.3 Descripción del problema

Las aguas residuales, también llamadas aguas negras, son una mezcla compleja que contiene, por lo común, más de un 99% de este líquido junto con contaminantes de naturaleza orgánica e inorgánica, tanto en suspensión como disueltos, en proporciones tales que la densidad relativa de esta solución diluida es similar a la del agua pura (Tebbutt, 1999). Los principales componentes de las aguas residuales, o contaminantes, demandan oxígeno, favorecen el desarrollo de organismos animales y vegetales en su seno, pueden ser tóxicos, a menudo infecciosos o, simplemente, darle a ésta un aspecto y prioridades desagradables, pero siempre pueden provocar, por vertidos incontrolados o por ausencia de medidas correctoras, impactos negativos en el medio ambiente, en los seres vivos y en los cuerpos receptores (González, 2002; Nebel y Wright, 1999).

Por lo tanto, si se permite la acumulación y estancamiento de las aguas residuales, la descomposición de la materia orgánica que contienen puede conducir a la generación de grandes cantidades de gases malolientes, a lo cual debe añadirse la frecuente presencia en éstas de microorganismos patógenos y causantes de enfermedades (Metcalf & Eddy,

2000). Es por esto que la evacuación inmediata de las aguas residuales de sus fuentes de generación así como su caracterización es relevante, porque en base a esta información, se puede realizar un tratamiento óptimo y económico (Nalco, 2000; Arboleda, 2000; Ramalho, 1999).

1.3.1 Situación de los Recursos Hídricos en México

La cantidad de agua que hay en la Tierra alcanza los 1,385 millones de km³. Sin embargo, menos del 3% de esta cantidad es agua dulce y de este total apenas el 0.3% es agua superficial (Pnuma, 2008).

Actualmente existen más de 28 países que se pueden considerar con problemas de escasez de agua, pues cuentan con una dotación menor a los 1,000 m³ por habitante al año, cifra considerada como crítica en cuanto a oferta del recurso se refiere; México se encuentra en un nivel medio con una disponibilidad de agua per capita de 5,000 m³ por año (portal.unesco.org/ 2006).

La demanda de agua continúa creciendo como consecuencia del incremento de la población: actualmente, la dotación per cápita a nivel mundial es 33% inferior a la que existía en 1970 y, a partir de entonces, cerca de 1,800 millones de personas se han sumado a la población mundial (Sánchez, 2006; Nebel y Wright, 1999).

Del total de agua dulce utilizada en el mundo, se estima que el 65% se destina para riego agrícola, el 25% para la industria y el 10% para consumo doméstico, comercial y otros servicios urbanos municipales, mientras que en México aproximadamente el 83% del volumen total de agua se destina al riego, 12% al abastecimiento de agua para uso doméstico, 3% al uso industrial y el 2% restante a la acuicultura (Manahan, 2007; Toledo, 2002).

En el mundo, 1.4 miles de millones de personas viven sin agua potable para consumo doméstico y 7 millones de personas al año mueren por enfermedades relacionadas con el agua; en México el 16.5% de las poblaciones viven sin agua potable para consumo doméstico. (www.geografía.laguia2000.com)

La mitad de los ríos del planeta están seriamente contaminados. En México, el 68% de las aguas superficiales presentan problemas de contaminación, de éstas, la cuenca Lerma-Chápalá-Santiago es una de las de mayor índice de contaminación en el país. (www.centrogeo.org.mx/internet2/.../intro.htm).

1.3.2 Contaminación del Agua

La contaminación de las corrientes con descargas de aguas negras no tratadas y desechos industriales es un problema serio que va en aumento en casi todos los países en desarrollo (Schulz y Okun, 1990). Según un informe de 2003 de la World Commission on Water in the 21 st Century; la mitad de los 500 ríos del mundo están muy contaminados y casi todos ellos atraviesan países en desarrollo. Muchos de estos países no tienen dinero para construir plantas de tratamiento de desechos ni tampoco tienen o no hacen cumplir leyes para controlar la contaminación del agua. Según el Global Water Policy Project, casi todas las ciudades en los países en desarrollo descargan 80-90% de sus aguas negras no tratadas directamente en ríos, corrientes y lagos, cuyas aguas después utilizan como agua potable, para bañarse y para lavar ropa. De ahí, que la mayor preocupación sobre la seguridad del agua es ahora la presencia potencial de contaminantes químicos (Manahan, 2007 FAO, 1993).

Así mismo, la disponibilidad del agua depende no sólo de la cantidad, sino también de su calidad (Aldana, 2009). Aunque haya agua, si está contaminada y se encuentra en una condición tal que sea no acorde con el uso que se le quiere dar, su empleo se limita. En la antigüedad, la calidad del agua se calificaba sólo por su aspecto, sabor, color y olor (Jiménez, 2002). Actualmente, los avances científicos y tecnológicos han repercutido en el desarrollo de técnicas analíticas y procesos capaces de identificar y de remover una amplia lista de compuestos, a tal grado que posible hacer agua “potable” mediante la depuración de agua residual. Sin embargo, debido a su costo, tales conocimientos no se aplican en forma común; más aún, no se plasman en políticas integrales de administración del agua que busquen:

- La conservación del recurso (agua superficial y subterránea).

- La preservación de su calidad, y,
- Su uso eficiente (reúso, ahorro y recirculación del agua).

Así, queda aún mucho por lograr en términos del mejoramiento de la calidad y la distribución de la cantidad, tanto en el Tercer Mundo como en los países desarrollados, en aspectos que pueden ser similares o muy diferentes (Schulz y Okun, 1990). Los retos actuales abarcan desde el suministro de agua microbiológicamente aceptable, mediante el empleo de procesos sencillos, hasta el desarrollo de sofisticados métodos de control para remover contaminantes complejos y de daño a largo plazo, e incluso, de efectos poco conocidos (Ramalho, 1990; Tebbut, 1990; Andia, 2000).

1.3.3 Principales fuentes de contaminación

Es un hecho que el agua rara vez se encuentre en forma pura y, afortunadamente, para fines prácticos no se le requiere así o no importa el que contenga otros compuestos; todo depende del uso que se le dé (Stanley, 2007).

En general, se considera como “contaminante” al exceso de materia o energía (calor) que provoque daño a los humanos, animales, plantas y bienes, o bien, que perturbe negativamente las actividades que normalmente se desarrollan cerca o dentro del agua (Nebel y Wright, 1999). De esta forma, no existe una división precisa entre las aguas contaminadas y las no contaminadas; este calificativo se atribuye en función del uso, las exigencias higiénicas y del grado de avance de la ciencia y tecnología para determinar los efectos y medir los contaminantes (Ramalho, 1999). A pesar de la dificultad para definir la contaminación, es claro que ésta provoca el abatimiento o muerte de la flora y fauna, impide el uso del agua en industrias o ciudades y deteriora el medio ambiente, e incluso el paisaje (Nebel y Wright, 1999).

El origen de la contaminación es muy variado, pero se pueden citar como causantes a las siguientes, principales fuentes de la contaminación del agua son: la agricultura, las industrias y la minería (Fernández, 2006). Las actividades agrícolas son por mucho la causa principal de la contaminación del agua (Stanley, 2007; Ramalho, 1990). El sedimento erosionado de los terrenos es una de las fuentes principales. Otros

contaminantes destacados son los fertilizantes y pesticidas, las bacterias del ganado y los desechos de procesamiento de alimentos y la sal excesiva de los terrenos cultivables irrigados (Tyler, 2007). El cambio climático por el calentamiento global también contamina el agua. En un mundo más cálido, algunas áreas tendrán más precipitación y otras menos.

Los principales contaminantes del agua y sus fuente			
Tipo/Efectos	Ejemplos	Fuentes principales	
Agentes infecciosos <i>Causan enfermedades</i>	Bacterias, virus, parásitos	Desechos humanos y animales	
Desechos q consume oxígeno <i>Agotan el oxígeno disuelto necesario para las especies acuáticas.</i>	Desechos animales biodegradables y restos de las plantas	Aguas negras, criaderos de animales, plantas de procesamiento de alimentos, fabricas de papel	
Nutrientes de las plantas <i>Provocan el crecimiento excesivo de las algas y de otras especies</i>	Nitratos (NO ₃ ⁻) y fosfatos (PO ₄ ³⁻)	Aguas negras, desechos animales, fertilizantes inorgánicos	
Sustancias químicas orgánicas <i>Agregan toxinas a los sistemas acuáticos</i>	Petróleo, gasolina, plásticos, pesticidas, solventes para limpieza	Industria, granjas, hogares	
Sustancias químicas inorgánicas <i>Agregan toxinas a los sistemas acuáticos</i>	Ácidos, sales, compuestos metálicos	Industria, hogares, afluencia superficial	
Sedimentos <i>Interrumpe la fotosíntesis, las redes alimentarias y otros procesos</i>	Tierra, lodo	Erosión de la Tierra	
Térmicos <i>Vuelven vulnerables a algunas especies ante las enfermedades</i>	Calor	Plantas generadoras de electricidad e industriales	

Tabla 1. Contaminación del agua: las fuentes, los tipos y los efectos. Tabla obtenida del libro: Ciencia Ambiental Desarrollo sostenible Un enfoque integral. G. Tyler Jr. Miller, 8ª Edición.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA



2.1 Definición de agua residual

El término agua residual o agua negra define un tipo de agua que está contaminada con sustancias fecales y orina, procedentes de desechos orgánicos humanos o animales (Rojas, 2002). Su importancia es tal que requiere sistemas de canalización, tratamiento y desalojo. Su tratamiento nulo o indebido genera graves problemas de contaminación (Metcalf & Eddy, 2000).

A las aguas residuales también se les llama aguas servidas, fecales o cloacales. Son residuales, habiendo sido usada el agua, constituyen un residuo, algo que no sirve para el usuario directo; y cloacales porque son transportadas mediante cloacas (del latín cloaca, alcantarilla), nombre que se le da habitualmente al colector (Seoáñez, 2005). Algunos autores hacen una diferencia entre aguas servidas y aguas residuales en el sentido que las primeras solo provendrían del uso doméstico y las segundas corresponderían a la mezcla de aguas domésticas e industriales. En todo caso, están constituidas por todas aquellas aguas que son conducidas por el alcantarillado e incluyen, a veces, las aguas de lluvia y las infiltraciones de agua del terreno (Metcalf & Eddy, 2000).

Todas las aguas naturales contienen cantidades variables de otras sustancias en concentraciones que varían de unos pocos mg/litro en el agua de lluvia a cerca de 35 mg/litro en el agua de mar (Romero, 1999; Ramalho, 1996). A esto hay que añadir, en las aguas residuales, las impurezas procedentes del proceso productor de desechos, que son los propiamente llamados vertidos. Las aguas residuales pueden estar contaminadas por desechos urbanos o bien proceder de los variados procesos industriales (Nebel y Wright, 1999).

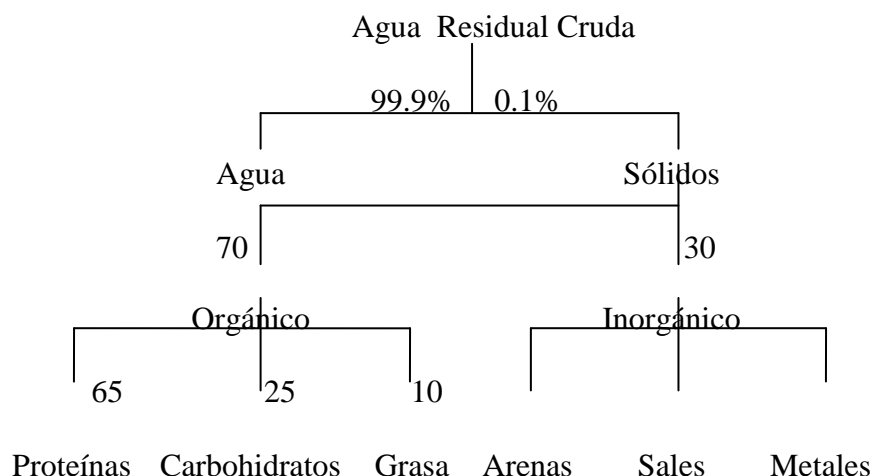


Figura 1. Composición del agua residual.

La composición y su tratamiento pueden diferir mucho de un caso a otro, por lo que en los residuos industriales es preferible la depuración en el origen del vertido que su depuración conjunta posterior (Rojas, 2002). Por su estado físico se puede distinguir, fracción suspendida: desbaste, decantación, filtración. Fracción coloidal: precipitación química. Fracción soluble: oxidación química, tratamientos biológicos, etc. La coloidal y la suspendida se agrupan en el ensayo de materias en suspensión o Sólidos Suspendidos Totales (SST). Sustancias químicas (composición) (Metcalf & Eddy, 2000).

Las aguas servidas están formadas por un 99% de agua y un 1% de sólidos en suspensión y solución (Tebbut, 1999; Romero, 1999; Ramalho, 1996). Estos sólidos pueden clasificarse en orgánicos e inorgánicos. Los sólidos inorgánicos están formados principalmente por nitrógeno, fosforo, cloruros, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos y algunas sustancias toxicas como arsénico, cianuro, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc. Los sólidos orgánicos se pueden clasificar en nitrogenados y no nitrogenados. Los nitrogenados, es decir, los que contienen nitrógeno en su molécula, son proteínas, ureas, aminas y aminoácidos. Los no nitrogenados son principalmente celulosa, grasas y jabones. La concentración de orgánicos en el agua se determina a través de la DBO_5 , la cual mide material orgánico carbonáceo principalmente, mientras que la DBO_{20} mide material orgánico carbonáceo y nitrogenado (Ramalho, 1996; Osorio, 2010).

2.1.1 Características bacteriológicas

Una de las razones más importantes para tratar las aguas residuales o servidas es la eliminación de todos los agentes patógenos de origen humano presentes en las excretas con el propósito de cortar el ciclo epidemiológico de transmisión. Estos son, entre otros: coliformes totales, coliformes fecales, salmonellas, virus, materia en suspensión y materia disuelta (Seoáñez, 2005; Romero, 1999).

A efectos del tratamiento, la gran división es entre materia en suspensión y materia disuelta. La materia en suspensión se separa por tratamientos fisicoquímicos, variantes de la sedimentación y filtración (Aguilar, 2002). En el caso de la materia suspendida sólida se trata de separaciones sólido - líquido por gravedad o medios filtrantes y, en el caso de la materia aceitosa, se emplea la separación L-L, habitualmente por flotación (Seoáñez, 2005). La materia disuelta puede ser orgánica, en cuyo caso el método más extendido es su insolubilización como material celular (y se convierte en un caso de separación S-L) o inorgánica, en cuyo caso se deben emplear caros tratamientos fisicoquímicos como la ósmosis (Metcalf & Eddy, 2000).

Los diferentes métodos de tratamiento atienden al tipo de contaminación: para la materia en suspensión, tanto orgánica como inorgánica, se emplea la sedimentación y la filtración en todas sus variantes (Tebbut, 1999). Para la materia disuelta se emplean los tratamientos biológicos (a veces la oxidación química) si es orgánica, o los métodos de membranas, como la ósmosis, si es inorgánica (Metcalf & Eddy, 2000; Jiménez, 2002).

Análisis típicos de agua residual			
Característica	Fuente		
mg/l	Cruda	Sedimentada	Efluente final
DBO	300	175	20
DQO	700	400	90
COT	200	90	30
SS	400	200	30
N.amonacal	40	40	5
NO ₃ -N	<1	<1	20

Tabla 2. Análisis típicos de agua residual

Principales parámetros a estudiar y analizar con el objetivo de poder conocer las características de un agua residual, mencionados en la Directiva Europea, son: temperatura, pH, sólidos en suspensión totales (SST), materia orgánica valorada como demanda química de oxígeno (DQO) y demanda biológica de oxígeno (DBO₅), nitrógeno total Kjeldahl (NTK), nitrógeno amoniacal y nitratos (Seoáñez, 2005; Romero, 1999; Nemerow and Dasgupta, 1998).

También hay otros parámetros a tener en cuenta como fósforo total, nitritos, sulfuros, sólidos disueltos (Ramalho, 1996). Para cuantificar el grado de contaminación y poder establecer el sistema de tratamiento más adecuado, se utilizan varios parámetros expresados en las normas oficiales mexicanas, en función del re uso que se le quiera dar al agua tratada. Entre las cuales, contamos con las siguientes normas oficiales mexicanas en materia de: Descargas de Aguas Residuales son:

- NOM-001-SEMARNAT-1996. La cuál marca los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- NOM-002-SEMARNAT-1996. En ella se establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

- NOM-003-SEMARNAT-1997. Norma que regula los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

2.2 Sistemas de Tratamiento

En lo que compete a saneamiento y específicamente al tratamiento de aguas residuales, el agua recolecta de los pueblos y ciudades, debe devolverse al medio ambiente en condiciones tales que no la deteriore (Ramalho, 1996). Durante las últimas décadas de este siglo, el mundo ha venido observando con inquietud una serie de problemas relacionados con la disposición de desechos líquidos provenientes del uso doméstico, comercial e industrial (Seóñez, 2005). Muchas veces las masas receptoras de estos desechos líquidos son incapaces de adsorber y neutralizar la carga contaminante. Por este motivo, las aguas residuales antes de su descarga a los cursos y cuerpos receptores, deben recibir algún tipo de tratamiento que modifique sus condiciones iniciales (Stanley, 2007; Tebbut, 1999).

Los procesos y las operaciones unitarias se agrupan bajo la denominación de tratamiento primario, secundario y terciario (Metcalf & Eddy, 2000). En el tratamiento primario se agrupan las operaciones del tipo físico, en el secundario los procesos biológicos de asimilación de la materia orgánica, así como los procesos químicos, el término terciario se aplica a las operaciones y procesos utilizados para eliminar contaminantes no removidos por el tratamiento primario o secundario (Romero, 2005).

La selección del proceso de tratamiento depende del uso al cual se le destinará al efluente tratado, la naturaleza del agua residual, la compatibilidad de las distintas operaciones y procesos, los medios disponibles de evacuación de los contaminantes finales y la posibilidad económica de las distintas combinaciones.

2.3 Tipos de tratamiento

Un sistema de tratamiento de aguas residuales es seleccionado de acuerdo a los objetivos que se fijan al buscar la remoción de los contaminantes. Los sistemas de tratamiento que

implican procesos biológicos, procesos fisicoquímicos, y en algunas ocasiones se presentan ambos (Metcalf & Eddy,2000).

2.3.1 Pre tratamiento de las aguas residuales.

Se define como el proceso de eliminación de los constituyentes de las aguas residuales cuya presencia pueda provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos, operaciones y sistemas auxiliares (Metcalf & Eddy, 2000).

2.3.2 Tratamiento primario de las aguas residuales.

En esta etapa se elimina una fracción de los sólidos en suspensión y de la materia orgánica del agua residual. Esta eliminación suele llevarse a cabo mediante operaciones físicas tales como el tamizado y la sedimentación. El efluente del tratamiento primario suele contener una cantidad considerable de materia orgánica y una DBO alta (Metcalf & Eddy, 2000).

2.3.3 Tratamiento secundario convencional.

Esta etapa esta principalmente encaminada a la eliminación de los sólidos en suspensión y de los compuestos orgánicos biodegradables, aunque a menudo se incluye la desinfección como parte del tratamiento secundario (Metcalf & Eddy, 2000).

2.3.3.1 Control y Eliminación de Nutrientes.

La eliminación y control de los nutrientes presentes en el agua residual es importante por diversas razones. Normalmente, es necesario debido a (1) vertido a cuerpos de agua receptores confinados, en los que se pueda crear o acelerar los procesos de eutrofización; (2) vertidos a cursos de agua en los que la nitrificación pueda limitar los recursos de oxígeno o en los que pueda proliferar el arraigamiento de plantas acuáticas, y (3) recarga de aguas subterráneas que puedan ser usadas, indirectamente, para el abastecimiento público de agua. Los principales nutrientes contenidos en las aguas residuales son el nitrógeno y el fósforo, y su eliminación puede llevarse a cabo por procesos químicos, biológicos o bien una combinación de ambos (Bautista, 2003; Metcalf & Eddy, 2000).

2.3.4 Tratamiento terciario.

Se utiliza cuando se requiere eliminar constituyentes de las aguas residuales que merecen especial atención, como los nutrientes los compuestos tóxicos y los excesos de materia orgánica o de sólidos en suspensión (Metcalf & Eddy, 2000).

Toda agua residual o servida debe ser tratada tanto para proteger la salud pública como para preservar el medio ambiente (Romero, 2005). Antes de tratar cualquier agua residual debemos conocer su composición. Esto es lo que se llama caracterización del agua. Permite conocer qué elementos químicos y biológicos están presentes y da la información necesaria para que los ingenieros expertos en tratamiento de aguas puedan diseñar una planta apropiada al agua residual que se está produciendo (Nalco, 2001).

Una Planta de tratamiento de Aguas Residual debe tener como propósito eliminar toda contaminación química y bacteriológica del agua que pueda ser nociva para los seres humanos, la flora y la fauna de manera que el agua sea dispuesta en el ambiente en forma segura (Reynolds, 2001). El proceso, además, debe ser optimizado de manera que la planta no produzca olores ofensivos hacia la comunidad en la cual está inserta. Una planta de aguas residual bien operada debe eliminar al menos un 90% de la materia orgánica y de los microorganismos patógenos presentes en ella (Benavidez et al., 2008).

La etapa primaria elimina el 60% de los sólidos suspendidos y un 35% de la DBO. La etapa secundaria, en cambio, elimina el 30% de los sólidos suspendidos y un 55% de la DBO (Tebbutt, 1999; Metcalf & Eddy, 2000).

2.4 Fundamentos teóricos de los procesos de Coagulación-Floculación

2.4.1 Generalidades

El tratamiento de agua puede subdividirse en cuatro etapas: clarificación, desinfección, acondicionamiento químico y acondicionamiento organoléptico (Andía, 2000). Para comprender mejor el estudio del proceso de clarificación del agua se introduce el concepto de turbiedad (Jiménez, 2002). Se entiende por turbiedad a la propiedad óptica de una muestra de diseminar y absorber la luz en lugar de transmitirla en línea recta (Romero,

2005). Existen dos tipos de equipos para medir turbiedad. En la primera clase de equipos están el turbidímetro de aguja de platino y la bujía de Jackson, los cuales son aptos para medir turbiedades altas. En la segunda clase de equipos está el turbidímetro Hach, que se utiliza para medir turbiedades bajas (nefelometría).

Además de turbiedad es posible también definir color (Romero, 2005). Se habla de color aparente si no se ha removido la turbiedad y de color verdadero del agua en caso contrario. En general el color se determina con tubos Nessler. El color del agua se debe principalmente a materia orgánica o minerales en suspensión o en estado coloidal. En general las sustancias liofílicas son responsables de la coloración del agua (Arboleda, 2000).

2.4.2 Caracterización de los coloides

El agua consta de tres tipos principales de impurezas: físicas, químicas y biológicas. Desde el punto de vista físico se puede hablar que los sólidos totales que son impurezas del agua se pueden clasificar como partículas no filtrables o en suspensión, filtrables o disueltas y una tercera posibilidad es el caso intermedio que corresponde a los coloides (Nalco, 2001). En general los coloides no tienen un límite fijo de tamaño y se suelen estudiar bajo un enfoque fisicoquímico desde el punto de vista de sus propiedades. Un material coloidal puede tardar 755 días en sedimentar por tanto es importante cambiar esta condición (Andía, 2000).

En cuanto a los coloides, se pueden clasificar en el rango de tamaño entre 1 mm a 1000 mm mediante un microscopio electrónico. Los coloides se pueden clasificar según varios aspectos. Pueden considerarse liofílicos si se estabilizan con capas de hidratación o bien liofóbicos si presentan repulsión por el solvente y por tanto son más inestables. También pueden clasificarse según sea su duración en Caduco (cambian rápidamente) o Diuturno (larga duración) (Trujillo, 2004; Andía, 2000). Del punto de vista de la química hay dos clases: orgánicos o inorgánicos. Según sea el tipo de aglomerado que conforman se clasifican en moleculares (polímeros) y en miscelares. Por último bajo un punto de vista de su forma, se puede decir que los cilíndricos son más propensos a aglutinarse que los esféricos o poliédricos (Arboleda, 2000).

Los coloides pueden estudiarse bajo una serie de propiedades. Las principales se presentan a continuación:

a) Propiedades cinéticas:

i) Movimiento Browniano: movimiento constante e irregular de los coloides.

ii) Difusión: dispersión por alta energía cinética. Responde a la ley de Fick.

iii) Presión Osmótica: Presión hidrostática que iguala dos medios (agua y sistema coloidal). El paso de agua iguala las concentraciones en ambos medios separados por una membrana semipermeable.

b) Propiedades ópticas:

i) Dispersión de la luz (efecto de Tyndall – Faraday): La dispersión de la luz es proporcional al tamaño de las partículas.

ii) Opalescencia: Las soluciones coloidales son incoloras generalmente. Sin embargo algunas pueden ser coloreadas. Esto depende de la diseminación de la luz y a la adsorción selectiva bajo cierta longitud de onda.

c) Propiedades de Superficie:

La superficie específica de los coloides en general es muy alta ya que las partículas son muy pequeñas. Esto permite que tengan una gran capacidad de adsorción de sustancias.

d) Propiedades electrocinéticas:

En este sentido se dice que los coloides en general tienen carga eléctrica y por tanto pueden ser afectados por campos eléctricos. Estas cargas pueden explicarse por la presencia de imperfecciones en la superficie de la estructura reticular. Puede también existir ionización y por tanto la superficie de los coloides puede ionizarse (los grupos funcionales probables de sufrir ionización son: -OH, -COOH, -

OPO₃H₂ y –SH) y por último puede haber adsorción preferencial de iones en la superficie de los coloides o bien haber ligandos de coordinación. A bajos pH una carga positiva superficial prevalece. A altos pH prevalece la negativa y a pH intermedios podría haber un valor cero.

e) Estabilidad de los coloides:

Los coloides son normalmente estables en solución. En general priman los factores estabilizantes por sobre los desestabilizantes (Tebbutt, 1999). Entre los factores estabilizantes se cuentan a todas las fuerzas o fenómenos que generan repulsión entre ellos y por tanto, las fuerzas electrostáticas y la hidratación son favorables. Las fuerzas de atracción, en cambio, cumplen un papel opuesto y desestabilizan. Entre ellas la gravedad, el movimiento Browniano y las fuerzas de Van der Waals. Obviamente algunos fenómenos afectan el sistema mucho más que otros. Por ejemplo la influencia de la gravedad es despreciable (Andía, 2000; Arboleda; 2000).

2.4.3 Proceso de Coagulación-Floculación

La Coagulación y Floculación son dos procesos dentro de la etapa de clarificación del agua (Romero, 2005). Ambos procesos se pueden resumir como una etapa en la cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas llamadas flocs tal que su peso específico supere a la del agua y puedan precipitar. La coagulación se refiere al proceso de desestabilización de las partículas suspendidas de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas. La floculación tiene relación con los fenómenos de transporte dentro del líquido para que las partículas hagan contacto (Arboleda, 2000). Esto implica la formación de puentes químicos entre partículas de modo que se forme una malla de coágulos, la cual sería tridimensional y porosa. Así se formaría, mediante el crecimiento de partículas coaguladas, un floc suficientemente grande y pesado como para sedimentar (Tebbutt, 1999).

El término coágulo se refiere a las reacciones que suceden al agregar un reactivo químico (coagulante) en agua, originando productos insolubles. La coagulación comienza al agregar el coagulante al agua y dura fracciones de segundo (Gómez, 2002).

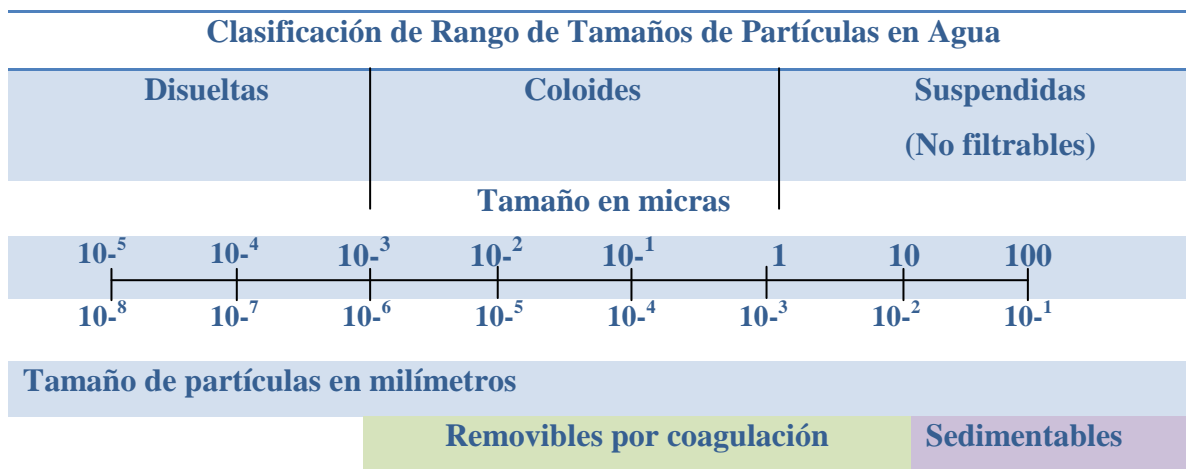


Tabla 3. Clasificación de Tamaños de Partículas en Agua
(Tebbutt, 1999)

2.4.4 Factores que intervienen en el proceso de Coagulación-Floculación

El método de Coagulación química es el proceso de desestabilización de las partículas suspendidas de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas, y este consiste en la adición de compuestos químicos, en las dosis óptimas en función del agua cruda para alterar el estado físico de los sólidos disueltos, coloidales o suspendidos, a fin de facilitar su remoción por precipitación o filtración, y la Floculación tiene relación con los fenómenos de transporte dentro del líquido para que las partículas hagan contacto esto implica la formación de puentes químicos entre las partículas de modo que se forme una malla de coágulos, la cual sería tridimensional y porosa (Pérez y Larrubia, 1995).. Así se formaría mediante el crecimiento de partículas coaguladas, un floculo suficientemente grande y pesado como para sedimentar (Van Olphen, 1977). El proceso de tratamiento de floculación consiste en la aglomeración de partículas desestabilizadas en el proceso de coagulación química, a través de medios mecánicos o hidráulicos. La floculación es el movimiento lento o agitación del agua residual que contiene una considerable cantidad de flóculos (Causa y Pinto, 1974).

Existen dos aspectos fundamentales en la coagulación-floculación: 1) la desestabilización de las partículas suspendidas, o sea la remoción de las fuerzas que las mantienen separadas (Coagulación) y 2) El transporte de ellas dentro del líquido para que hagan contacto,

generalmente estableciendo puentes entre si y formando una malla tridimensional de coágulos porosos (Floculación) (Muñoz et al., 2005).

La coagulación 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. La floculación es el fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas chocan unas con otras para formar coágulos mayores (Spellman, 2008).

Existen dos modelos de la coagulación. El modelo físico o de la doble capa, basado en fuerzas electrostáticas de atracción y repulsión. El otro modelo es químico, llamado “puente químico”, que relaciona una dependencia entre el coagulante y la superficie de los coloides (Arboleda, 2000).

Para la coagulación existen también dos modelos. El primero es llamado ortocinético, el cual es promovido por agitación externa principalmente. Influyen partículas de tamaño superior al micrón y tiene relación con los gradientes de velocidad del líquido (Andía, 2000).

El segundo modelo se llama pericinético y se diferencia del primero en que su fuente de agitación es interna. Principalmente importarán el movimiento browniano y la sedimentación. Su efecto es principalmente sobre partículas de tamaño inferior a 1 micrón (Andía, 2000; Arboleda, 2000).

La floculación es el proceso mediante el cual las moléculas ya desestabilizadas entran en contacto, agrandando los flocs de modo de facilitar la precipitación. La floculación puede presentarse mediante dos mecanismos: floculación ortocinética y pericinética, según sea el tamaño de las partículas desestabilizadas (en general todas las partículas se ven afectadas por ambos mecanismos). Las partículas pequeñas ($< 1\mu\text{m}$) están sometidas a floculación pericinética, motivada por el movimiento browniano, mientras que las que presentan un tamaño mayor, están afectadas principalmente por el gradiente de velocidad del líquido, predominando en ella la floculación ortocinética (Gómez, 2002).

2.4.5 Coagulantes más utilizados

Los coagulantes principalmente utilizados son las sales de aluminio y de hierro. Las reacciones de precipitación que tienen lugar con cada coagulante son las siguientes:

- Sulfato de aluminio (también conocido como sulfato de alúmina) ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$). Cuando se añade sulfato de aluminio al agua residual que contiene alcalinidad de carbonato ácido de calcio y magnesio, la reacción que tiene lugar es la siguiente: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 3 \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 = 2 \text{Al}(\text{OH})_3 + 3 \text{CaSO}_4 + 6 \text{CO}_2$. La reacción es análoga cuando se sustituye el bicarbonato de cálcico por la sal de magnesio. El rango de pH para la coagulación óptima fluctúa entre 5 y 7.5. Las dosis en tratamiento de aguas residuales, de 100 a 300 g/m^3 según el tipo de agua residual y la exigencia de calidad.
- Con cal, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = 2 \text{Al}(\text{OH})_3 + 3 \text{CaSO}_4$. La dosis que se necesita de cal es un tercio de la dosis de sulfato de aluminio.
- Con carbonato de sodio, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{Na}_2\text{CO}_3 = 2\text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{Na}_2\text{SO}_4 + 3\text{CO}_2$. Dosis, se necesita entre el 50 y 100% de la dosis de sulfato de aluminio comercial.
- Sulfato ferroso (FeSO_4) Con alcalinidad natural, $\text{FeSO}_4 + \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 = \text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{CaSO}_4 + \text{CO}_2$ Seguido de: $\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Fe}(\text{OH})_3$ Rango de pH para la coagulación óptima, alrededor de 9.5. Dosis, se necesitan de 200 a 400 g/m^3 de reactivo comercial.
- Sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$). Con alcalinidad natural, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 = 2\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{CaSO}_4$. La dosis de cal, el 50% de la dosis de sulfato férrico.
- Cloruro férrico (FeCl_3). Con alcalinidad natural: $2\text{FeCl}_3 + 3\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 = 3\text{CaCl}_2 + 2\text{Fe}(\text{OH})_3 + 6\text{CO}_2$. Rango de pH para la coagulación óptima, entre 4 y 6, y mayor de 8. Dosis de 5 a 160 g/m^3 de reactivo comercial (es.wikibooks.org/...aguas_residuales/Tratamiento).

2.5 Características de los parámetros principales de medición a las aguas.

2.5.1 Potencial de Hidrógeno

El potencial de hidrogeno (pH), es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución. El pH indica la concentración de iones hidronio $[H_3O^+]$ presentes en determinadas sustancias. Este término fue acuñado por químico danés Sorensen, quien lo definió como el logaritmo negativo de base 10 de la actividad de los iones hidrógeno. Esto es:

$$pH = -\log_{10}(a_{H_3O^+})$$

Desde entonces, el término “pH” se ha utilizado universalmente por lo práctico que resulta para evitar el manejo de cifras largas y complejas. En disoluciones diluidas en lugar de utilizar la actividad del ión hidrógeno, se le puede aproximar empleando la concentración molar del ión hidrógeno.

2.5.2 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica es la capacidad de un cuerpo o medio para conducir la corriente eléctrica, es decir, permite el paso a través de él medio acuoso-sólido de partículas cargadas, bien sean los electrones, los transportadores de carga en conductores metálicos o semimetálicos, o iones, los que transportan la carga en disoluciones de electrolitos.

La conductividad en medios líquidos (disolución), está relacionada con la presencia de sales en solución, cuya disociación genera iones positivos y negativos capaces de transportar la energía eléctrica, si se somete el líquido a un campo eléctrico. Estos conductores iónicos se denominan electrolitos o conductores electrolíticos.

La conductividad eléctrica se utiliza para determinar la salinidad (contenido de sales) de suelos y substratos de cultivo, ya que se disuelven éstos en agua y se mide la conductividad del medio líquido resultante. Suele estar referenciada a $25^\circ C$ y el valor obtenido debe corregirse en función de la temperatura.

2.5.3 Turbidez

Se entiende por turbidez a la falta de transparencia de un líquido, debido a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos en suspensión haya en el líquido, generalmente se hace referencia al agua, más sucia parecerá ésta y más alta será la turbidez. La turbidez es considerada una buena medida de la calidad del agua, cuanto más turbia, menor será su calidad.

Hay varios parámetros que influyen en la turbidez del agua. Algunos de estos son:

- Presencia de fitoplancton, y/o crecimiento de las algas;
- Presencia de sedimentos procedentes de la erosión;
- Presencia de sedimentos re suspendidos del fondo (frecuentemente revueltos por peces que alimentan por el fondo, como la carpa);
- Descarga de efluentes, como por ejemplo escorrentías urbanas, mezclados en el agua que analiza;

El límite de turbidez del agua para consumo humano, según la OMS (Organización Mundial para la Salud), la turbidez del agua para consumo humano no debe superar en ningún caso las 5 NTU, y estará idealmente por debajo de 1 NTU.

2.5.4 Color verdadero y aparente

El color en el agua, puede estar asociado a sustancias en solución (color verdadero) o a sustancias en suspensión (color aparente). El primero es el que se obtiene a partir de mediciones realizadas sobre muestras filtradas por membranas de 0.45 μm , mientras que el segundo proviene de las mediciones directas sobre muestras sin filtrar.

Son causantes de color en cuerpos de aguas naturales o no –afectados, el material vegetal en descomposición, tipo ligninas, taninos, ácidos húmicos, fúlvicos, algas, etc. Y algunos minerales disueltos de hierro y manganeso. En vertimientos industriales o en cuerpos de agua afectados o contaminados por éstos, el color se asocia necesariamente al tipo particular de actividad asociada al vertimiento. El color predominante en el primer caso, varía desde una tonalidad amarilla hasta una tonalidad café; en el segundo caso el color puede ser muy variable, dependiendo de la actividad asociada con el vertimiento.

Teniendo en cuenta que en las aguas naturales los colores predominantes varían desde diferentes tonalidades amarillas hasta colores pardos o café claro y al hecho mismo de que estas tonalidades pueden ser simuladas con bastante aproximación por soluciones de cloroplatinato de potasio a diferentes concentraciones, se ha adoptado esta referencia para expresar la magnitud del color en muestras de aguas naturales.

2.5.5 Temperatura

Es usual expresar la temperatura con base en la escala celsius ($^{\circ}\text{C}$). El grado Celsius es una unidad de temperatura, sobre la escala celsius, la temperatura de fusión del agua pura a la presión de 101,325 kPa, es igual a 0°C y la ebullición del agua, a la misma presión, es igual a 100°C .

El método de prueba normado, establece el procedimiento para realizar la medición en el sitio donde se encuentra el agua, y el resultado se expresa en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$). En los fenómenos físicos que suceden dentro del agua, lo anterior tiene influencia en los tratamientos y abastecimientos para el agua, así como en la evaluación limnológica de un cuerpo de agua, por lo que es necesario medir la temperatura como un indicador de la presencia de compuestos y contaminantes en el agua, a través del método de prueba que se establece en la Norma Mexicana (NOM-AA-007-SCFI-2000).

El valor de temperatura es un criterio de calidad del agua para la protección de la vida acuática y para las fuentes de abastecimiento de agua potable, es también un parámetro establecido como límite máximo permitido en las descargas de aguas residuales y una especificación de importancia en los cálculos de balance de energía y de calor de los procesos industriales.

2.5.6 Sólidos Totales en un agua residual

Según su naturaleza química-biológica, los sólidos orgánicos: (50-80%). Son proteínas, carbono-hidratos, grasas que pueden degradarse biológicamente. La DBO5/DQO nos da una orientación sobre su degradabilidad.

Los sólidos inorgánicos (20-50%). Están constituidos por gravas, arcillas, arenas, metales (moléculas no orgánicas). No se degradan por la acción de las bacterias y permanecen como cenizas después de una calcinación.

Según su sedimentabilidad:

- Sólidos en suspensión o suspendidos (SS): (33%) son retenidos por filtros y visibles, y se clasifican en sólidos sedimentables o coloidales.
- Sólidos sedimentables: son capaces de flotar o decantar con el agua en reposo, son eliminados fácilmente mediante procesos físicos o mecánicos.
- Sólidos coloidales: No sedimentan o ni flotan cuando el agua está parada, o por lo menos en un tiempo computable. Tampoco son eliminables por métodos físicos o mecánicos, siendo necesario un proceso de coagulación y floculación.
- Sólidos disueltos: (60%) no son efectivas ninguna de las técnicas anteriores para eliminarlos, solo sería eliminables en parte mediante cambios de temperatura, pH mediante efectos coagulantes, etc. O por sistema de membranas, ósmosis inversa, nanofiltración ultrafiltración.
- Según su volatilidad:
- Sólidos fijos: son los que permanecen en el agua después de una calcinación a 550°C, durante una hora.

- **Sólidos volátiles:** son los que no quedan después de la calcinación anterior, y se calculan restando a los totales los fijos.

2.5.7 Prueba de jarras

La prueba de jarras es la principal técnica de laboratorio utilizada para determinar la dosis óptima de coagulantes para el tratamiento de un cuerpo de agua residual en el proceso de coagulación-floculación, aunque el aparato es simple se debe tener cuidado a fin de obtener resultados confiables (CEPIS, 1981). Una de las variables a estudiar es el potencial de hidrogeno del cuerpo de agua en estudio y su efecto sobre la formación de floculo y la remoción de turbiedad. En la prueba de jarras los coagulantes utilizados para la remoción de partículas deben de ser probados en condiciones absolutamente similares en cuanto a las muestras de agua cruda así como los tiempos de mezcla y clarificación. Ya que los coagulantes proporcionan cargas de signo contrario a las partículas coloidales que se encuentran en el agua cruda y cuya carga original es negativa por lo que provocan repulsión entre ellas. El potencial Z es una medida de esta fuerza de repulsión entre las partículas coloidales, y en cuanto mayor es el valor mayor es la carga de la partícula, de esta manera al colocar el coagulante las partículas se desestabilizan y comienzan el proceso de aglomeración, pero al no tener un cuidado con la cantidad de coagulante aplicado, este puede alterar nuevamente la carga de las partículas coloidales provocando con ello la dispersión de las partículas coloidales (Nalco, 2001). Al ser aplicado el coagulante al cuerpo de agua cruda se requiere de un mezclado, el cual se realiza mediante la prueba de jarras, el mezclado de gran intensidad del coagulante en el agua es el que origina la desestabilidad de las partículas suspendidas, se provoca el movimiento Browniano y la aglomeración de los coloides (floculo), los cuales al no ser lo suficientemente grandes pueden no tener la sedimentación rápida que se desea (Causa & Pinto, 1974).

Es esencial eliminar la turbidez para lograr la calidad del cuerpo de agua cruda, así el agua tratada será preparada para su re uso, y dependiendo de éste se decide que técnica continúa. En él tren de tratamiento de las aguas residuales (Romero, 2005). Las dosis óptimas de los coagulantes para el tratamiento de un agua cruda, deberán ser sometidas a diferentes

repeticiones en la prueba de jarras con dosificaciones diferentes, con los resultados obtenidos de cada coagulante se va a comparar su efectividad, y con ello identificar el que mejor reacción y beneficio genere.

La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización", especifica los siguientes límites permisibles de características físicas y organolépticas:

CARACTERÍSTICA	LIMITE PERMISIBLE
Color	Color 20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
Olor y Sabor Agradable	Se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su Equivalente en otro método.

Tabla 4. Límites permisibles de Características físicas y organolépticas del agua para consumo humano

Capítulo III

HIPÓTESIS Y OBJETIVOS



3.1 Hipótesis

El ión calcio, Ca^{2+} , al igual que el ión aluminio Al^{3+} , es un catión que puede promover la floculación. Encontrar una fuente adecuada de calcio puede ser una alternativa al uso del aluminio en el proceso de coagulación–floculación del tratamiento de aguas residuales sin provocar cambios significativos o adversos en las características físicas y químicas de aguas y lodos residuales

3.2 Objetivos

3.2.1 Objetivo General

Determinar las dosis óptimas de sulfato de Calcio Di-Hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en el proceso de coagulación floculación para aguas residuales de la ciudad de Querétaro.

3.2.2 Objetivo Particulares

1. Generar una alternativa tecnológica para la etapa de tratamiento primario de aguas residuales utilizando como coagulante el Sulfato de Calcio Di-Hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).
2. Mediante la prueba de Jarras, establecer las dosis óptimas para aguas residuales con carga orgánica y carga inorgánica.
3. Analizar el comportamiento del sulfato de Calcio Di-Hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) como coagulante-floculante, comparándolo con el uso tradición el del sulfato de aluminio. Mediante la evaluación de propiedades físico-químicas tales como pH, turbidez, sólidos suspendidos totales, conductividad eléctrica, entre otros parámetros que regulan la calidad de las aguas residuales.

CAPÍTULO IV
METODOLOGÍA
Y
MATERIALES



4.1 Descripción del Sitio de Muestreo

Se trabajó con el siguiente sitio de muestreo, el cual es:

La Planta de Tratamiento CEA (Comisión Estatal de Agua), ubicada en Av. 5 de febrero #35, Col. Las Campanas, C.P. 76010, Santiago de Querétaro, Qro. Y dentro de estas instalaciones el punto de muestreo es en el canal de entrada a las instalaciones con coordenadas. 20° 35'25.74" N, 100° 24'53.60" O con una elevación sobre el nivel de mar de 1813 metros.

El agua recolectada, en este sitio de muestreo, sirvió como nuestro patrón de estudios.

4.2 Toma de Muestra y su caracterización

El muestreo se realizó de acuerdo a la norma NMX-AA-003-1980 esta norma establece los lineamientos generales y recomendaciones para muestrear las descargas de aguas residuales, con el fin de determinar sus características físicas y químicas, debiéndose observar las modalidades indicadas en las normas de métodos de prueba correspondientes. Cuando las aguas residuales fluyen libremente como es el caso de los ríos las muestras deberán tomarse preferentemente del centro del canal donde exista mayor turbulencia, la cual nos asegura un buen mezclado del agua, las muestras obtenidas deben ser representativas de las condiciones que existan en el punto y hora de muestreo y tener el volumen suficiente para efectuar las pruebas necesarias. Además se registran los datos más relevantes de la muestra así como las características del lugar de estudio. Las muestras se mantienen en refrigeración a una temperatura de 4°C. La norma también especifica que el intervalo de tiempo entre la extracción de la muestra y su análisis debe ser el menor tiempo posible y no debe exceder un tiempo mayor a tres días.

Se tomaron las muestras de nuestra agua a tratar en el canal del influente de la planta de tratamiento de la CEA, estas fueron recolectadas en recipientes con capacidad de 19 L., una cantidad de 4 recipientes que equivalen a 74 L. por cada muestreo.

Se realizó la caracterización y el registro del agua residual o cruda obtenida en el sitio de estudio (Planta de Tratamiento CEA) para obtener los parámetros originales

(características físicas, químicas y microbiológicas). Una vez sometidas al pre-tratamiento Coagulación-floculación, mediante la técnica de Jarras con el coagulante propuesto Sulfato de Calcio Di-Hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) Di Hidratado y Sulfato de Aluminio, las aguas ahora tratadas se analizaron para obtener sus nuevas características en cuanto al contenido de sus elementos originales y así se verificó la eficacia del pre-tratamiento primario Coagulación-Floculación.

Los parámetros a medir en el cuerpo de agua residual y el cuerpo de agua tratada fueron temperatura, conductividad eléctrica, Potencial de Hidrogeno, sólidos sedimentables, sólidos totales, sólidos disueltos, color verdadero, color aparente, turbidez, determinación de oxígeno disuelto, demanda química de oxígeno.

Esta caracterización se realizó en base al siguiente esquema:

PARÁMETRO A MEDIR	EQUIPO	ABREVIACIÓN UNIDADES	REFERENCIA	OBSERVACIONES
1.- Temperatura	Termómetro	T, °C	NMX-AA-003-1980	De preferencia se toma en el sitio.
2.- Potencial de Hidrógeno	Potenciómetro	pH, s/u		Un volumen mínimo de 100 mL
3.- Turbidez	Espectrofotómetro	T, NTU	NMX-AA-038-SCFI-2001	DE preferencia se toma en el sitio.
4.- Conductividad Eléctrica	Conductivímetro	C, mS/cm	NMX-AA-012-SCF-2000	De ser posible realizar la medición en el sitio.
5.- Color	Colorímetro	C, Pt-Co	NMX-AA-045-SCFI-2001	Es mejor realizar esta medición de una muestra compuesta.
6.- Sólidos Disueltos Totales (SDT); Sólidos Suspendidos Totales (SST) y los Sólidos Totales (ST)	Bomba de Vacío Conos Imhoff	SDT, mg/l SST, mg/l ST, mg/l	NMX-AA-034-SCFI-2001	Se realizan en el laboratorio
7.- Determinación de Oxígeno Disuelto	Espectrofotómetro Hach 4000	mg O ₂ /l	NMX-AA-012-SCFI-2000	Se realizan en el laboratorio
8.- Determinación Bioquímica de Oxígeno	Espectrofotómetro Hach 4000	mg/l	NMX-AA-030-SCFI-2001	Se realizan en el laboratorio

Tabla 5. Descripción de los parámetros a medir

La dosis de los coagulantes Sulfato de Calcio Di-Hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) Di Hidratado y Sulfato de Aluminio a aplicar en un inicio mediante el uso del aparato de Jarras fueron los siguientes:

COAGULANTE	DOSIS (gr/l)				
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5

Tabla 6. Dosis de Aplicación

Las concentraciones óptimas se eligieron basándonos en los resultados obtenidos después de aplicar la prueba de jarras, cuya prueba se basa en el uso del manual de CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 1981).

4.3 Análisis de las muestras

4.3.1 Determinación del Potencial de Hidrogeno

El aparato utilizado para medir el pH de nuestras aguas es un pH/COND METER modelo D-54 de marca HORIBA.

La forma de medir el pH fue: se prende el aparato con el botón on/off, al encender se revisa que aparezcan cuatro gotas con los números 4,7 y 10, estas nos indican que el aparato esta calibrado correctamente, se coloca el electrodo dentro del recipiente (vaso de precipitado de 1 litro (l)), con agua ya sea cruda o procesada con la aplicación de las diferentes dosis de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, a una altura constante, se presiona la tecla grabada con la palabra (MEAS), hasta que en la pantalla aparezca la palabra HOLD una vez aparecida en pantalla, esta parpadea y se detiene en el momento en que se registra la lectura al parámetro correspondiente de tal forma que ese valor es el que se registra como la lectura para dicho parámetro de caracterización. Se repite el procedimiento cuatro veces para obtener un promedio.

Al cambiar el electrodo a otro recipiente, este se debe enjuagar con agua destilada y secar procurando no dejar gotas ni restos de agua. Esto mismo se hace al terminar toda medición y al momento de guardarlo el tubo que lo protege contiene una esponja en su interior esta debe estar ligeramente húmeda.



Imagen 1 Dispositivo y Electrodo de medición de pH



Imagen 2 Dispositivo de medición de pH



Imagen 3 Electrodo de medición de pH

4.3.2 Determinación de la Conductividad Eléctrica

El aparato utilizado para medir la conductividad de nuestras aguas es un pH/COND METER modelo D-54 de marca HORIBA (es el mismo aparato utilizado en las mediciones del pH).

El procedimiento de medición de la conductividad es: se prende el aparato con el botón on/off, al encender se revisa que aparezcan cuatro gotas con los números 4,7 y 10, esto indica que el aparato está calibrado correctamente, por automático al encender el equipo aparece en modo para medir el pH por lo cual se requiere de presionar la tecla impresa con la palabra (MODE) hasta encontrar la pantalla de conductividad, se coloca el electrodo

asignado a la conductividad dentro del recipiente (vaso de precipitado de 1 litro), con agua ya sea cruda o procesada según fuera el caso de las diferentes dosis de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ a una altura constante, se presiona la tecla impresa con la palabra (MEAS) hasta que en la pantalla aparezca la palabra (HOLD) una vez aparecida en pantalla solo resta esperar a que se detenga el marcador para capturar el valor señalado, se repite el procedimiento cuatro veces para obtener un promedio.

Al cambiar el electrodo a otro recipiente, este se debe enjuagar con agua destilada y secar procurando no dejar gotas ni restos de agua. Esto mismo se hace al terminar toda medición y al momento de guardarlo el tubo debe estar completamente seco.

4.3.3 Determinación de la Turbidez

El aparato utilizado para medir la Turbidez fue un Spectrophometer DR/4000U, versión 2.42, con serie N° 0406U0005668, de marca HACH.

El procedimiento para la medición de la Turbidez es: se enciende el aparato, y se espera a se realice un auto reconocimiento de todos los programas con los cuales se cuenta, ya que se termina de efectuar dicho recorrido. Se tecléa el número de programa, correspondiente al 3750, apareciendo la pantalla como se muestra en la figura 4.

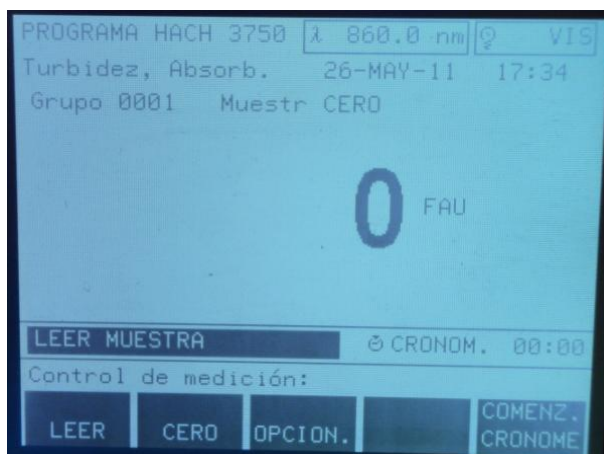


Imagen 4 Pantalla del programa de Turbidez

Se coloca en una celda rectangular, con boca circular específica para el aparato agua destilada una cantidad de 10 a 25 ml, el cual nos sirve como nuestro control, se presiona el botón indicador CERO, sacamos la celda con agua destilada y en otra celda limpia vaciamos las aguas tanto cruda como con tratamiento y se presiona cada vez que se coloca la celda la tecla LEER, registrándose la lectura en la base de datos.

En la primera parte de la experimentación únicamente se tomaba la medición de turbidez habiendo transcurridos los 15 minutos de sedimentación, realizándose en repeticiones de cuatro para cada dosis pero sin variarlo con el tiempo. Por otro lado, se realizó las mediciones de turbidez variándola con el tiempo de la siguiente manera se comienza cinco minutos después de apagado el aparato de jarras y posterior mente en intervalos de tiempo de (10, 15, 20, 30 min, 1 y 2 hrs), con estos resultados llenamos nuestra hoja de cálculo. Esta forma de registrar los resultados, se realizó en una segunda parte de la experimentación. Para cada dosis se toman cuatro lecturas y se promedian.

Imagen 5. Spectrophometer DR/4000U



4.3.4 Determinación del Color Verdadero y Aparente

Para obtener el color verdadero y aparente que contienen nuestras aguas utilizamos el mismo aparato que se ocupó para medir la turbidez. Utilizando el programa 1670 que nos mide tanto el color verdadero como el color aparente en unidades de platino cobalto. Apareciendo una pantalla como la que se muestra en la figura 6.

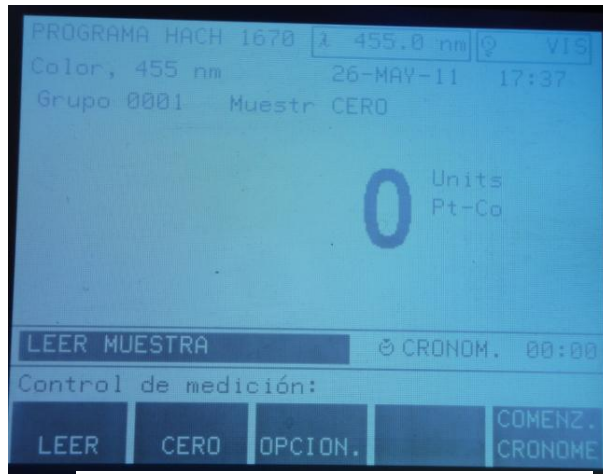


Imagen 6 Pantalla del programa del Color

Para medir el color aparente simplemente se coloca en una celda agua destilada para obtener muestra base de medición, se presiona el botón de CERO, posteriormente se toma una muestra del agua cruda y se coloca en otra celda limpia y comenzamos a LEER, se toman cuatro lecturas para después obtener un promedio, de esta manera se repite para las demás aguas con su respectivo tratamiento.

Para el color verdadero se repite el procedimiento de el color aparente con la diferencia de filtrar el agua cruda y agua con dosis.

4.3.5 Medición de la temperatura

La temperatura de cada una de nuestras aguas fue tomada con el aparato pH/COND METER modelo D-54 de marca HORIBA, al mismo tiempo que se tomaba la medida del pH.

4.3.6 Cuantificación de los SST (Sólidos Suspendedos Totales)

Sólidos constituidos por sólidos sedimentables, sólidos y materia orgánica en suspensión y/o coloidal, que son retenidas en el elemento filtrante.

Método de medición:

1. Tomar muestra y preparar las disoluciones.

2. Poner a peso constante los crisoles Gooch para la determinación de sólidos suspendidos por método gravimétrico.
3. Poner a peso constante los filtros Gooch (filtrante no incinerables de 1 micra). Es adecuada la determinación de peso constante del crisol Gooch junto con su filtro.
4. Color un sistema de filtración: adaptador para Gooch junto con su filtro.
5. Colocar una muestra de agua filtrada mediante una pipeta volumétrica de 10 ó 20ml (el volumen de muestra depende del volumen del crisol y la concentración esperada de sólidos disueltos totales).
6. Seleccionar el tamaño de muestra para obtener entre 2.5 y 200 mg de residuo seco en el filtro. Registrar el volumen total de muestra filtrada.
7. Una vez filtrado, evaporar la muestra por lo menos una hora a 105° C, enfriar en desecador hasta obtener un balance de la temperatura y pesar.
8. Repetir el ciclo de secado, enfriamiento en desecador, pesado hasta obtener un peso constante o hasta tener una variación menor del 4% entre pesadas.
9. Calcular los sólidos disueltos totales con la siguiente fórmula:

$$SST(mg / l) = \frac{(A - B) * 1000}{\text{Volumen de muestra, en ml}} \quad \text{donde:}$$

A = peso del residuo seco más crisol Gooch, en mg.

B = tara del crisol Gooch, en mg.

4.3.6.1 Sólidos sedimentables (cono imhoff)

El método para medir los sólidos sedimentables consiste en la decantación de la muestra tomada, en el cono de Imhoff. El cono de Imhoff es un recipiente cónico de vidrio o plástico rígido en nuestro caso de plástico, en donde se coloca un litro de muestra fresca de agua y se deja en reposo durante dos horas. Transcurrido este tiempo se lee directamente en la graduación del cono, los mililitros de sólidos sedimentables por litro de muestra. Luego se sacan los sólidos y se pesan en una balanza, para obtener la cantidad de miligramos por litro en la muestra tomada.



Imagen 7. Prueba de los conos Imhoff

4.4 Prueba de Jarras

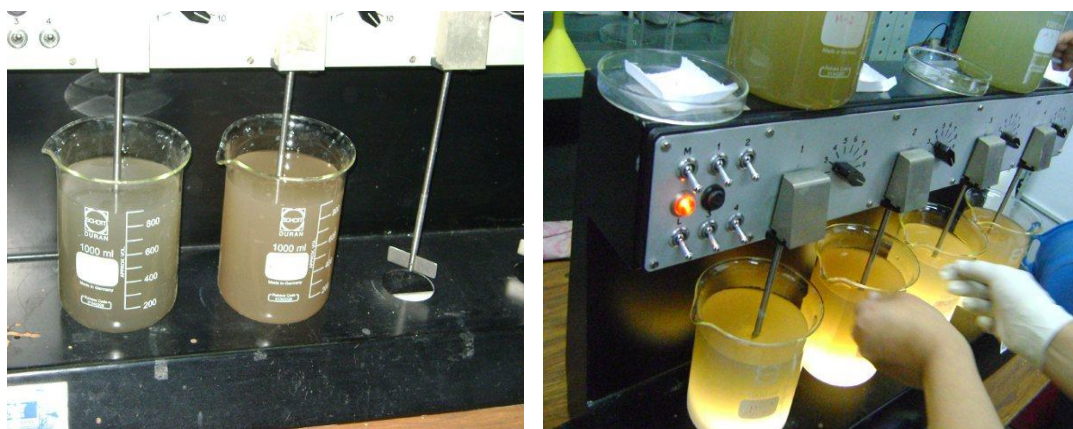


Imagen 8. Prueba de Jarras con dosis desde 0.5 gr/L hasta 2.5gr/L

4.4.1. Procedimiento en el análisis de las aguas residuales utilizando el aparato de jarras

1. Moler el coagulante en el mortero
2. Pesar el reactivo coagulante
3. Pesar el coadyuvante si es necesaria su aplicación

4. Diluirlos en una porción del agua de la muestra por separado
5. Encender el aparato de jarras y homogenizar la muestra por un minuto
6. Transcurrido el minuto agregar el coagulante previamente diluido justo en el vórtice que se forma por la velocidad aplicada de 100 rpm, y dejarlo actuar por un minuto.
7. Transcurrido el minuto disminuir la velocidad a 40 rpm y agregar el coadyuvante previamente diluido, dejar actuar por 20 minutos y apagar el aparato de jarras. Checar el tiempo en que tarda la formación de flóculos y reportarla.
8. Quitarle las paletas del aparato de jarras, sin remover el agua para evitar romper los flóculos, y dejar sedimentar.
9. Comenzar hacer las mediciones de turbidez a los tiempos dados (cada 5", 10", 15", 20", 30", 1 hr y 2 hrs).
10. En el lapso de 30" a 1 hr o de 1 hr a 2 hrs, hacer las mediciones de pH, C.E. y temperaturas.
11. Transcurridas todas las mediciones, hacer una infiltración si es necesario.
12. Cuantificar el volumen de lodos generados por la dosis aplicada.
13. Tratar de hacer las conclusiones necesarias en cada una de las turbideces atípicas.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN



5.1 Resultados de la caracterización del agua cruda

En los primeros muestreos se obtuvieron los siguientes datos en el agua cruda.

Determinación	Promedio	Desviación Estándar	Valor Máximo	Valor Mínimo	Unidades
DBO ₅	1,561.98	3.98	1565.80	1557.30	mg/L
Grasas y Aceites	86.78	6.93	94.30	78.40	mg/L
DQO	1851.65	2.79	1855.60	1849.03	mg/L
SST	286.00	0.816	290.00	288.00	mg/L
pH	7.30	0.314	7.40	7.20	---
Turbiedad	103.78	0.727	104.50	103.10	UTN

Tabla 7. Resultados de Caracterización del Agua Cruda

En la tabla 7, se puede valor que la demanda bioquímica de oxígeno presenta un valor promedio muy por encima de los valores típicos, que normalmente se observan, en este tipo de aguas residuales. De acuerdo con Metcalf & Eddy (2000) se sitúan entre los 250 - 350 g/m³, situación que nos indica por una parte que probablemente, presenta descargas con origen de actividad industrial. Así mismo, la demanda química de oxígeno es un reflejo de este hecho. Por otro lado, las grasas y aceites si reflejan un estado típico correspondiente a un agua residual doméstica. En la misma circunstancias se encuentran los parámetros de sólidos suspendidos totales (SST), el pH ya que los valores típicos en estas variables son: 200 mg/l y entre 6 y 8 para el potencial de hidrógeno (pH).

Después de aplicar los dos tratamientos a las muestras recolectadas se obtuvieron los siguientes resultados, la línea roja es la aplicación del CaSO₄·2H₂O, la línea azul discontinua es la aplicación con Al₂(SO₄)₃·18H₂O como coagulante. Se obtuvieron las lecturas de potencial de hidrógeno que se pueden valorar en la gráfica, a medida que se incrementaba la dosis de ambos coagulantes-floculantes. Como se puede valorar en la figura, se aprecia que con la dosis mínima el coagulante sulfato de aluminio le imprime un carácter ácido, esto se debe a que cuando el agua cruda presenta un carácter neutro, al

agregar el sulfato de aluminio se hidroliza formando hidróxido de aluminio coloidal y una cantidad equivalente de ácido sulfúrico de acuerdo con la ecuación química, siguiente:

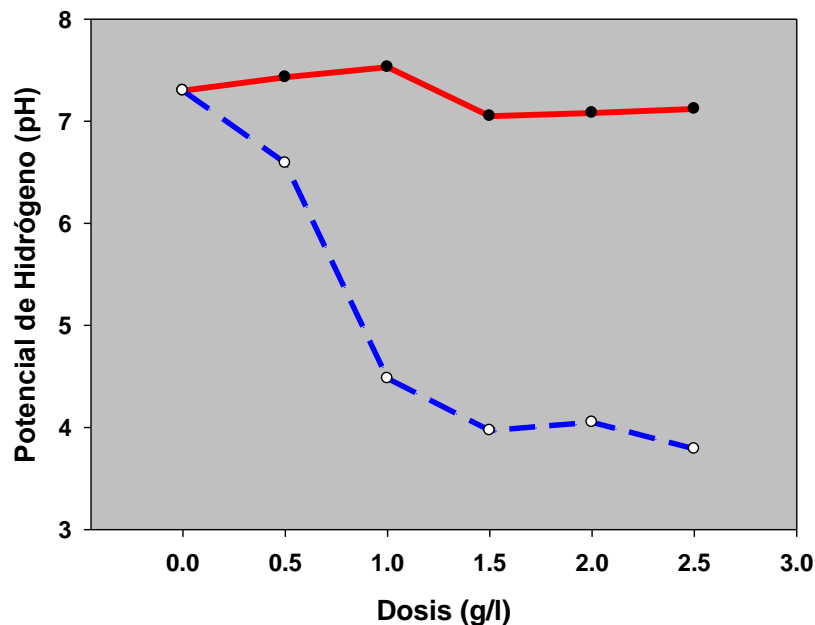


Con las consecuencias, que este hecho presenta, tanto para el impacto que puede llegar a causar en el medio ambiente, como por lo que representa para el bienestar del ser humano.

5.2 Resultados obtenidos después de aplicar la Prueba de Jarras

Por otra parte, la aplicación del sulfato de calcio di hidratado independientemente del incremento de la dosis se observa que este coagulante le imprime un carácter neutro al agua tratada. Es importante resaltar, que ambos coagulantes fueron aplicados sin variar el pH original del agua cruda.

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Qro.



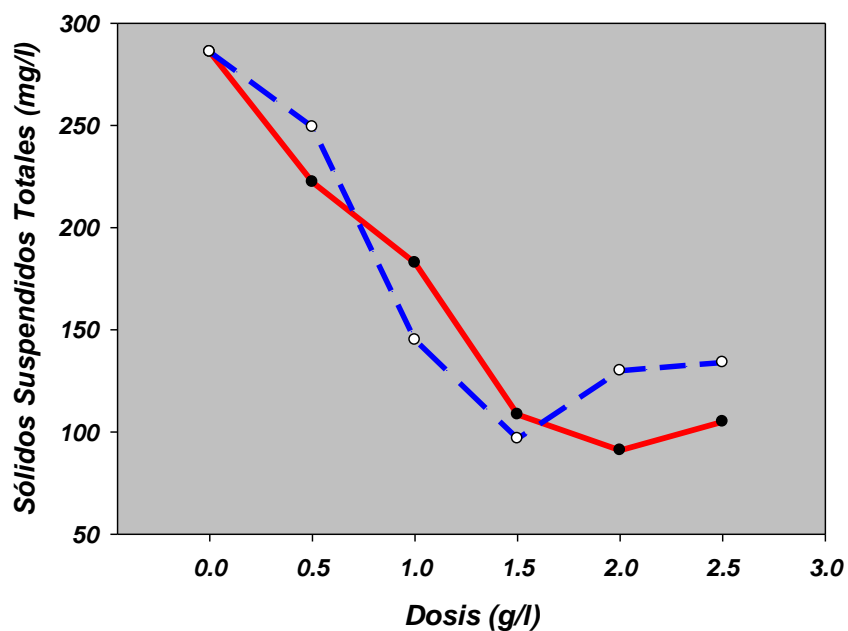
Grafica 1. Comparación de Ph y Dosis

TRATAMIENTO CON $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ———

TRATAMIENTO CON $\text{Al}_2(\text{SO}_4) \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ - - - - -

En la gráfica 2, de los sólidos suspendidos totales contra el incremento de las dosis de ambos coagulantes. Se observa un comportamiento semejante, para los dos coagulantes-floculantes donde en lo que corresponde al sulfato de aluminio se nota que para la dosis de 1.5 g/l de sulfato de aluminio, se logra la mayor remoción de SST por debajo de los 100 mg/l para después comenzar a incrementar su concentración. En el caso del sulfato de calcio di hidratado se valora que para la dosis de 2 g/l se obtiene la mínima concentración de SST, con un porcentaje de remoción del 31%, para después volver a tener una alza. Este comportamiento está relacionado, probablemente con la sobresaturación de la solución.

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Qro.

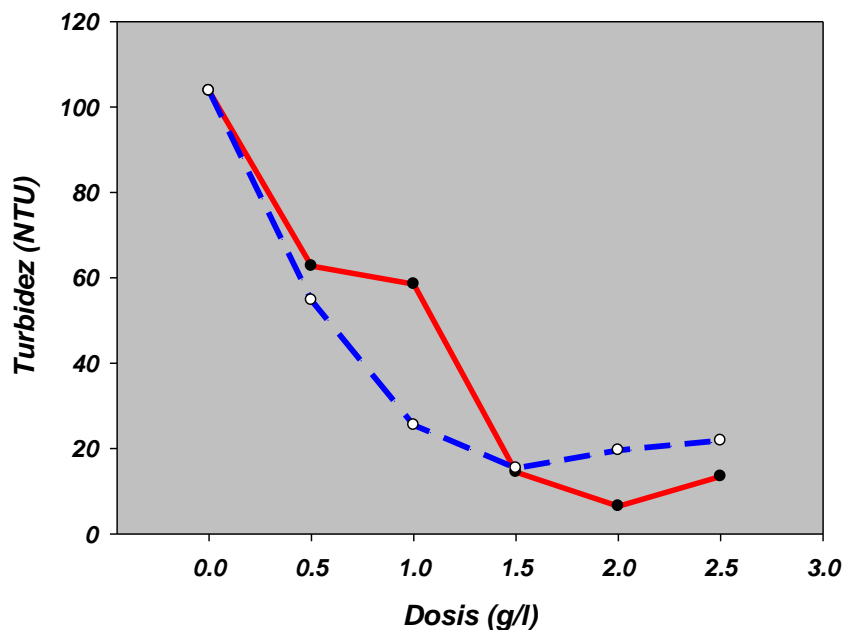


Grafica 2. Comparación de SST y Dosis

Para el caso de la variable turbidez, la cual es una de las variables más significativa respecto a la valoración de la remoción de contaminantes, ya que se valora visualmente el éxito que puede llegar a presentar los coagulantes aplicados en un determinado tipo de aguas residuales. En la gráfica se aprecia que a medida que se incrementa la dosis de los coagulantes se alcanzan mayores porcentajes de remoción. Siendo para el sulfato de

aluminio en la dosis de 1.5 g/l, donde se alcanza el mayor porcentaje de remoción. Sin embargo, es importante resaltar que para esta dosis el valor de pH que se obtiene es por debajo de 4, considerándose un agua de carácter ácido. Por otro lado, para el caso del sulfato de calcio la mejor dosis para este tipo de agua residual se observa en 2 g/l alcanzando un valor de 5.04 NTU alcanzando con ello un porcentaje de remoción del orden del 95.14%, siendo este resultado bastante satisfactorio. Así mismo se valora en la gráfica que en ambos coagulantes después de alcanzar su punto óptimo el fenómeno comienza a revertirse.

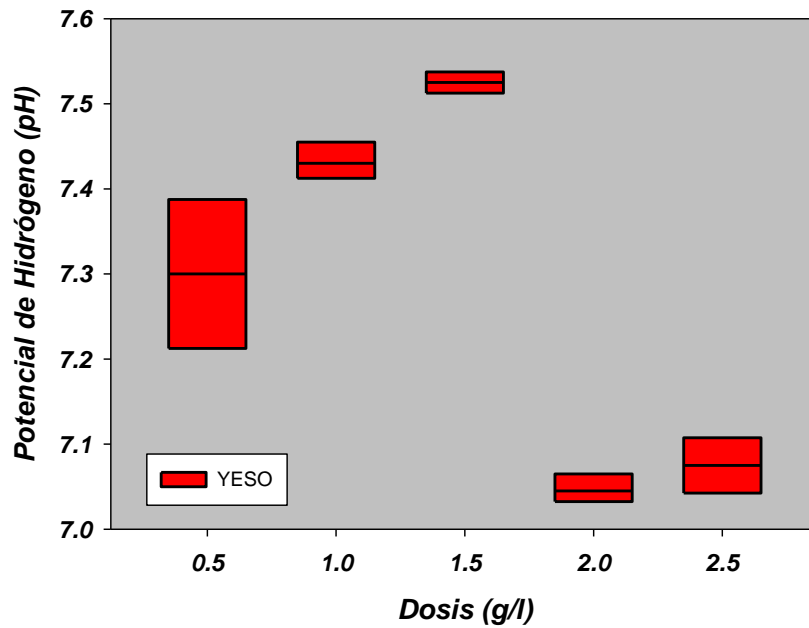
Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Qro.



Grafica 3. Comparación de Turbidez y Dosis

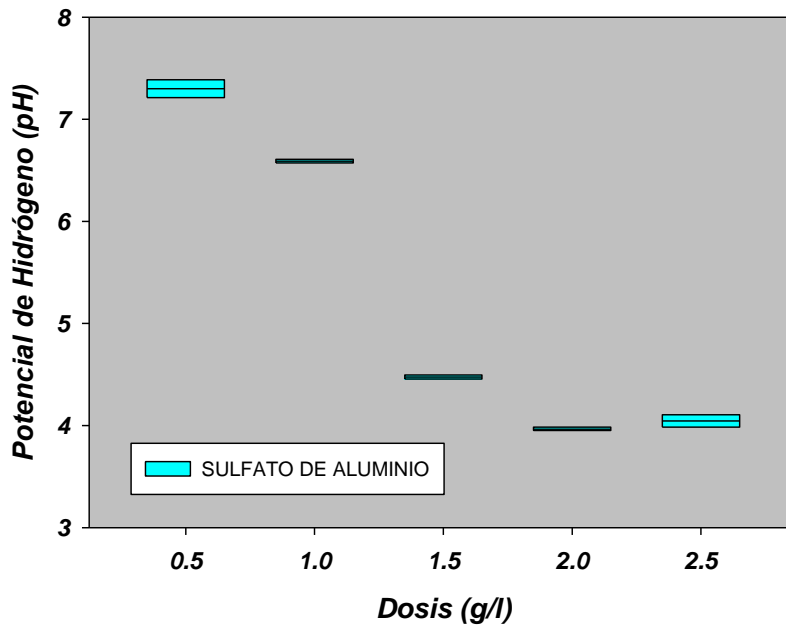
En las siguientes gráficas se observa los valores máximos, mínimos en cada una de las dosis así como su punto medio, donde se puede apreciar que para el caso del sulfato de calcio en la dosis de 0.5 g/l, se nota una diferencia importante sin embargo, en las dosis subsecuentes esta diferencia ya no es tan relevante pudiendo atribuir este hecho al probable ajuste del aparato ya que este mismo comportamiento se presenta para el caso del sulfato de aluminio. Se aprecia que en las dosis de mayor porcentaje de remoción en ambos coagulantes, la diferencia entre los valores máximo y mínimo para cada dosis es menor.

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Qro.



Grafica 4. Comparación de Ph y Dosis (yeso)

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Qro.

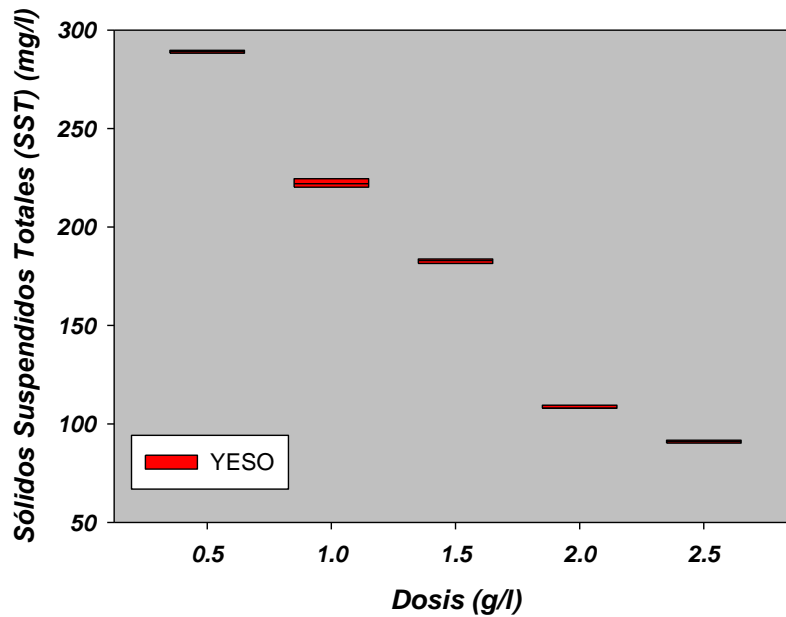


Grafica 5. Comparación de Ph y Dosis (aluminio)

5.3 Valores máximos y mínimos obtenidos con respecto a la media

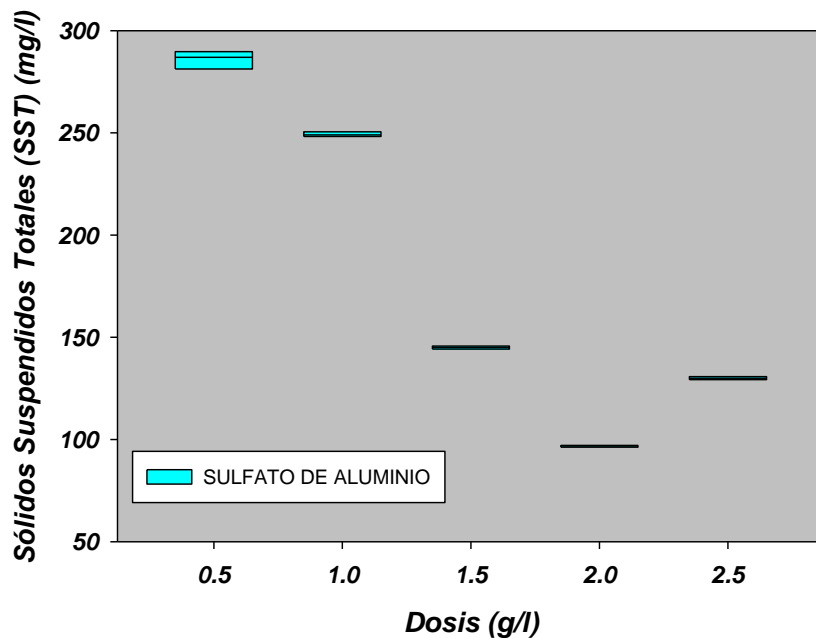
Para la variable de sólidos suspendidos totales (SST), la diferencia entre los valores máximos y mínimos por dosis de coagulantes fue prácticamente despreciable, lo cual es un reflejo del dominio de la técnica para obtener los valores.

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Qro.



Grafica 6. Comparación de SST y Dosis (yeso)

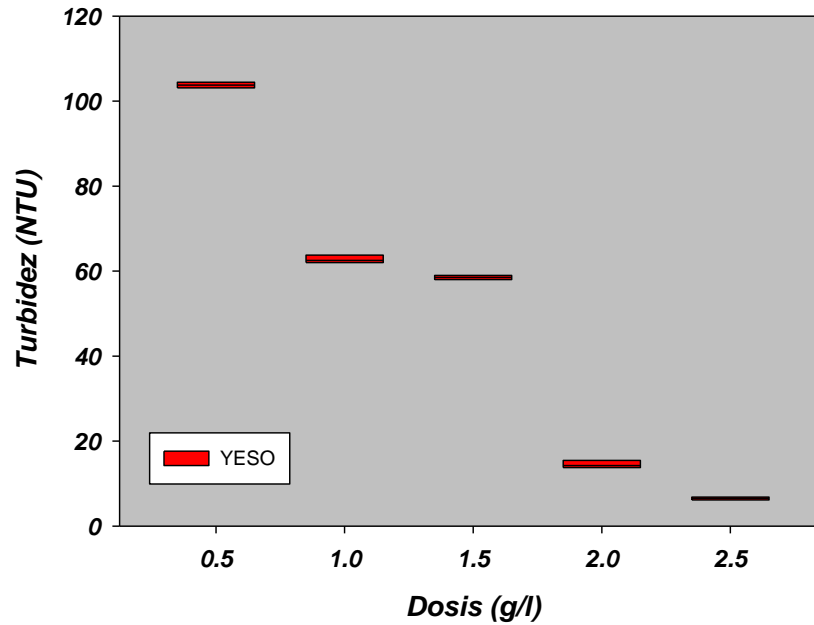
Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Qro.



Grafica 7. Comparación de SST y Dosis (aluminio)

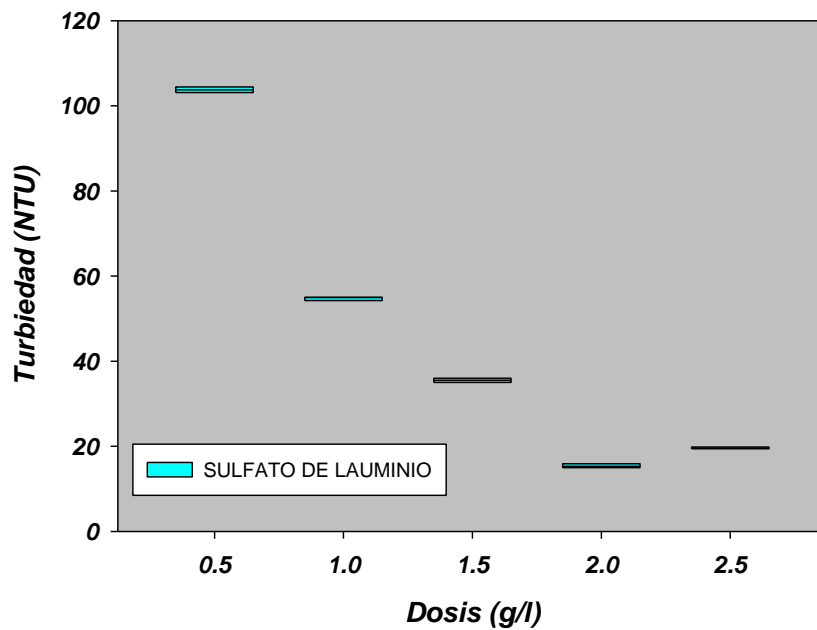
En el caso del parámetro turbidez, se puede observar en ambas gráficas tanto con el coagulante sulfato de calcio como con el sulfato de aluminio que la diferencia entre los valores máximos y mínimos es mínima, imprimiendo con ello un valor de confianza en los resultados reportados.

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Qro.



Gráfica 8. Comparación de Turbidez y Dosis (yeso)

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Qro.



Gráfica 9. Comparación de Turbidez y Dosis (aluminio)

5.4 Porcentajes de remoción

Es importante resaltar que las variables con las que se considera evaluado un tratamiento primario coagulación-floculación, son: los sólidos suspendidos totales y la DBO₅. Sin embargo por ser esta última un parámetro de calidad en el que su proceso de determinación es algo lento al llevarse cuando menos cinco días la obtención de su resultado, así como su costo a nivel laboratorio algo elevado. Se decidió no incluirlo en la valoración de la efectividad de los coagulantes aplicados. Por lo anterior los parámetros de respuesta a considerar fueron la turbidez y los sólidos suspendidos totales. Valorando con ello la clarificación lograda con la aplicación del sulfato de calcio di hidratado contra el uso tradicional del sulfato de aluminio. Como se puede apreciar en la tabla, la mejor dosis fue la de 2 g/l, alcanzando un porcentaje de remoción del 93.74%, contra un 81.10% para la misma dosis aplicando el sulfato de aluminio. Logrando así mismo con este resultado romper la creencia de que un coagulante divalente pudiera llegar a tener menor capacidad de remoción de partículas coloidales en un agua residual.

Tabla 8. Comparativa de yeso y aluminio en Turbidez con diferentes Dosis

INDICADOR	Agua Cruda	Dosis (g/l)	T.YESO	% Remoción	Dosis (g/l)	T.S. ALUMINIO	% Remoción	Dosis (g/l)
<i>Turbidez</i>	103.78	0.50	62.75	39.54	0.50	54.75	47.24	0.50
	103.78	1.00	58.50	43.63	1.00	25.50	75.43	1.00
	103.78	1.50	14.49	86.04	1.50	15.40	85.16	1.50
	103.78	2.00	6.50	93.74	2.00	19.61	81.10	2.00
	103.78	2.50	13.46	87.03	2.50	21.86	78.94	2.50

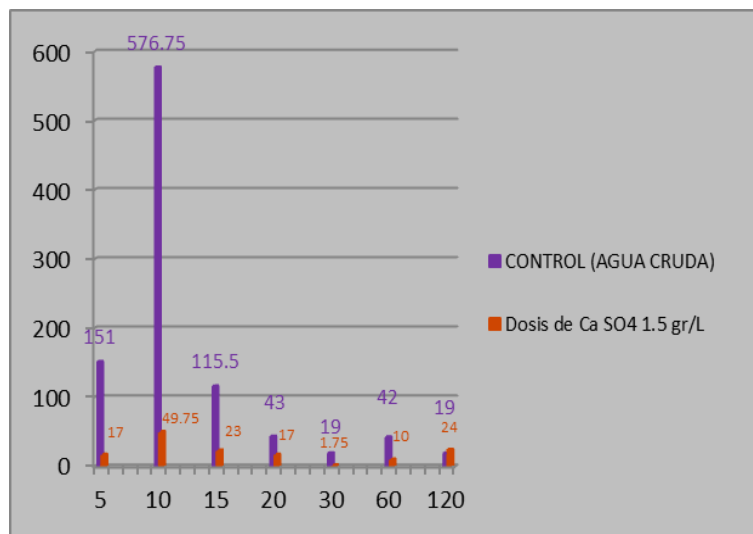
Por otro lado, en lo que corresponde al parámetro de los sólidos suspendidos totales, se confirma la dosis óptima para el caso del sulfato de calcio di hidratado, siendo esta de 2 g/l alcanzando un porcentaje de remoción del 91% y para el caso del sulfato de aluminio en la misma dosis tan solo se logra el 54.55% de remoción.

Tabla 9. Comparativa de yeso y aluminio en SST con diferentes Dosis

INDICADOR	Agua Cruda	Dosis (g/l)	T.YESO	% Remoción	Dosis (g/l)	T.S. ALUMINIO	% Remoción	Dosis (g/l)
SST	286.00	0.50	222.25	22.29	0.50	249.25	12.85	0.50
	286.00	1.00	182.75	36.10	1.00	145.00	49.30	1.00
	286.00	1.50	108.50	62.06	1.50	96.75	66.17	1.50
	286.00	2.00	91.00	68.18	2.00	130.00	54.55	2.00
	286.00	2.50	105.00	63.29	2.50	134.00	53.15	2.50

5.5 Comportamiento de la variable turbidez con respecto al tiempo

En esta sección se presentan los resultados obtenidos después de aplicar diversas dosis de sulfato de calcio di hidratado en el agua cruda como fue evolucionando con respecto a varios intervalos de tiempo después de aplicar la técnica de jarras. A los 5 minutos, 10, 15, 20, 25, 30, 60, 120 minutos. Información que nos ayuda a decidir sobre los tiempos de retención del agua residual tratada en el tanque de sedimentación.

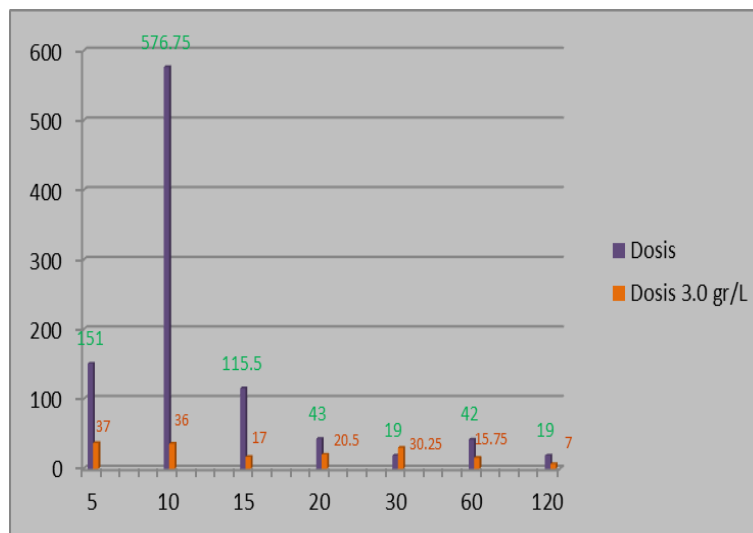


Grafica 10. Comparación de Turbidez contra tiempo para dosis de 1.5g/L de Ca SO4

En la gráfica--- se observa en el eje de las ordenadas los valores de turbidez obtenidos y para el eje de las abscisas representan los intervalos de tiempo en los cuales fue reportada la turbidez. Así mismo, en la gráfica ---- podemos notar que las barras de color morado representan el agua cruda, es decir sin la aplicación del coagulante sulfato de calcio di

hidratado, únicamente sometida a los movimientos centrífugos, que proporciona el aparato de jarras. Se valora que tan solo con dicho movimiento se promueve el choque de coloides logrando desestabilizar las fuerzas de repulsión existentes entre ellas, sin embargo, no se alcanzan porcentajes de remoción de turbidez importantes. Cabe mencionar que para el tiempo de 10 minutos se presentó un considerable repunte en el valor de la turbidez, esto se debe a un error que se cometió en el laboratorio al manipular el frasco que contenía dicha muestra de una manera burda logrando con ello remover los sólidos que se encontraban sedimentados.

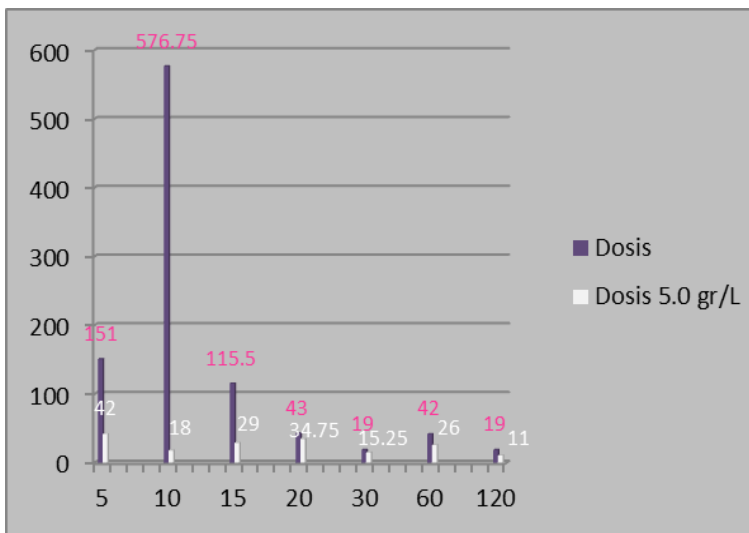
En lo que corresponde a las barras de color rojo, representan el tratamiento con sulfato de calcio a una concentración de 1.5 g/l, podemos notar que el tiempo en que se alcanza una mayor remoción de turbidez es para los 30 minutos registrándose un valor de 1.75 FAU, y a partir de este valor comienza a incrementar su turbidez, este fenómeno puede tener varias explicaciones una de ellas puede ser la forma de manipular las muestras, los incrementos de temperatura, el propio tamaño de partícula, entre otros.



Grafica 11. Comparación de Turbidez contra tiempo para dosis de 3.0 g/L de Ca SO₄

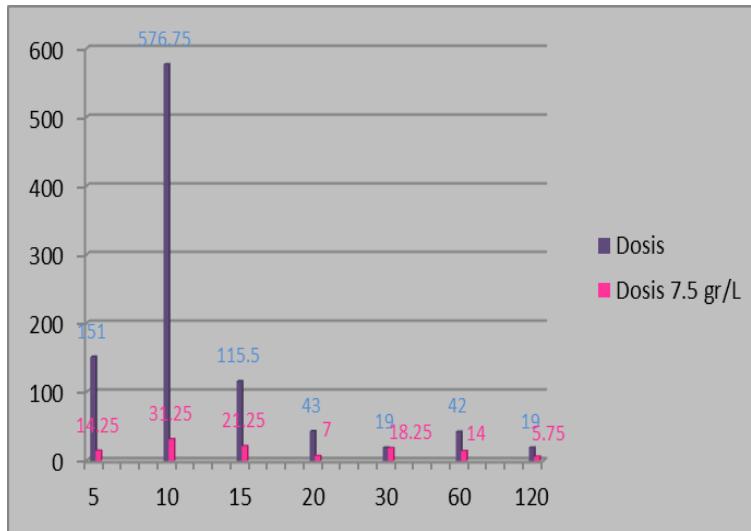
En esta gráfica--- se puede observar la comparación de las barras color morado, que representan el agua cruda contra las barras naranjas que representan el tratamiento aplicado con sulfato de calcio di hidratado a una concentración de 3 g/l, donde se nota un comportamiento semejante a los 30 minutos ya que de venir disminuyendo la turbidez en este punto se observa un incremento

para después a los 60 minutos volver a disminuir, hasta alcanzar en 120 minutos (2 horas), una turbidez de 7 FAU, valor aceptable ya que se alcanza prácticamente una claridad permitida con la norma NOM-127. Es importante resaltar que iniciamos a los 5 minutos con un valor de turbidez bajo de 37 FAU comparada con el de agua cruda la cuál presentaba un valor de 151 FAU, es en este punto donde se puede valorar de esta manera, la efectividad de haber realizado la coagulación-floculación, de una manera aceptable.



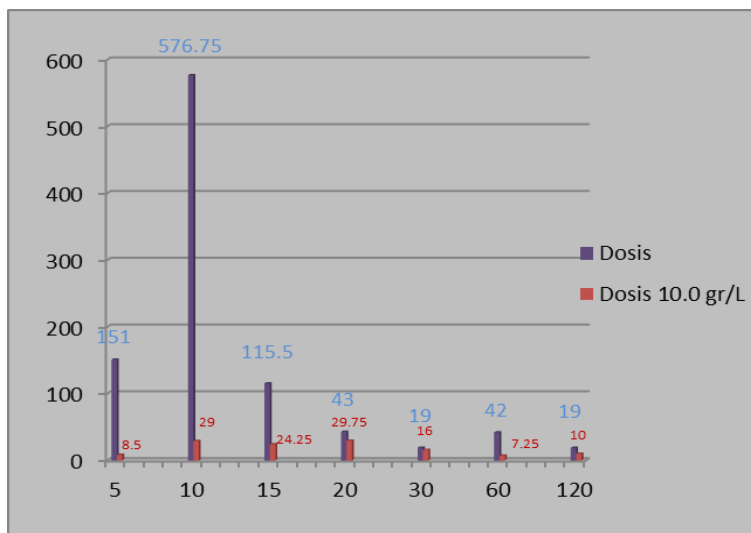
Grafica 12. Comparación de Turbidez contra tiempo para dosis de 5.0 g/L de Ca SO4

En la gráfica--- se observa la comparación entre el agua cruda y el tratamiento con sulfato de calcio di hidratado para la concentración de 5 g/l. Para esta concentración se observa, una variación importante en la evolución de la turbidez con respecto al tiempo con altas y bajas partiendo de una máxima turbidez a los 5 minutos de 42 FAU hasta una mínima de 11 FAU, para un período de 120 minutos. Los factores que pueden estar contribuyendo a esta variabilidad podrían ser la concentración del coagulante, el tamaño de partícula, la temperatura entre otros.



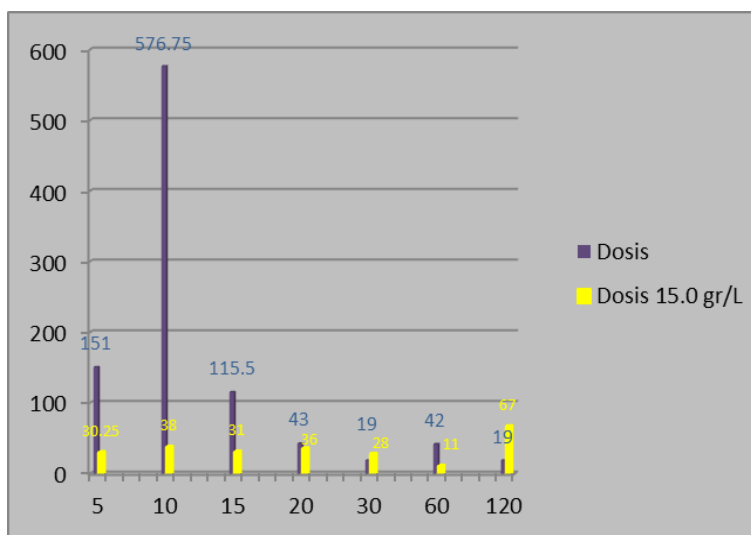
Grafica 13. Comparación de Turbidez contra tiempo para dosis de 7.5 g/L de Ca SO4

Se observa en la gráfica--- para la dosis de 10 g/l con el tratamiento de sulfato de calcio dihidratado, que desde los 5 minutos a partir de apagado el aparato de jarras se manejan valores de turbidez menores a las dosis anteriores comenzando con un valor de 8.5 FAU y lograr alcanzar un mínimo de 7.25 FAU a los 60 minutos, notándose que en los intervalos de tiempo de 10 minutos 15, y 20 se presentan los valores más altos, para después volver a disminuir hasta alcanzar el mínimo.



Grafica 14. Comparación de Turbidez contra tiempo para dosis de 10.0 g/L de Ca SO4

Por último, en la concentración de 15 g/l de sulfato de calcio di hidratado, el comportamiento de la turbidez se valora en la gráfica ---- se observaron valores más altos de los que ya se habían logrado con concentraciones más bajas. En esta concentración comenzamos con una turbidez de 30.25 FAU hasta alcanzar un valor mínimo en 60 minutos de 11 FAU. Como ya se había comentado, estas variaciones se pueden deber propiamente a la cinética de las reacciones que están ocurriendo en el interior de esta disolución conforme transcurre el tiempo.



Grafica 15. Comparación de Turbidez contra tiempo para dosis de 15.0 g/L de Ca SO₄

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES



6.1 Conclusiones

- De acuerdo con los resultados obtenidos, podemos decir que el sulfato de calcio dihidratado puede ser una alternativa viable, su aplicación como coagulante-floculante en aguas residuales
- El sulfato de calcio, definitivamente imprime un carácter neutro en el tratamiento de aguas residuales, sean con alta carga inorgánica o bien orgánica.
- Después de los estudios realizados se llega a la conclusión que para aguas residuales de origen urbano, se puede partir de una dosis óptima de 2 g/l con un rango de potencial de hidrógeno (pH) entre 6 y 8, no encontrando esos valores en el pH original del agua a tratar se complica para que se formen los hidroxilos, entre otros. En general los compuestos que barran con los coloides contaminantes.
- Es importante, mencionar que se recomienda aplicar el sulfato de calcio dihidratado previamente molido y diluido en determinada proporción de agua de la misma muestra a tratar. Con el propósito de lograr una mayor eficiencia.
- Los tiempos de retención en los tanques así como las velocidades a nivel laboratorio fueron las siguiente: Dejar homogenizar la muestra por un minuto posteriormente agregar el coagulante previamente diluido, permitir que se difumine por un minuto a una velocidad de 100 rpm transcurrido dicho periodo disminuir a 40 rpm por 15 minutos para que flocule. Transcurrido dicho tiempo se apaga el reactor y se deja reposar por otros 15 minutos

BIBLIOGRAFÍAS



Referencias bibliográficas

- NMX-AA-003-1980. Que establece los lineamientos generales y recomendación para muestrear las descargas de aguas residuales
- NMX-AA-012-SCF-2000 Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales residuales y residuales tratadas.
- NMX-AA-030-SCFI-2000. Determina de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NMX-AA-034-SCFI-2001 Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NMX-AA-038-SCFI-2001 Determinación de Turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NMX-AA-045-SCFI-2001 Determinación de color platino cobalto en aguas naturales residuales y residuales tratadas.
- NOM-AA-007-SCFI-2000. Determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
-
- (Berghuber, 2009). Berghuber, Konrad; Vogl, Christian, R.; Elias, Silvel. 2009. “La auto organización de la Gestión del Agua y sus problemas en el caserío Vista Hermosa del departamento San Marcos, Guatemala”. Editorial Ra Ximhaí. Vol. 5, Núm.3.
- (Toledo, 2002) Toledo A. 2002. “El agua en México y el Mundo. Gaceta del Instituto Nacional de Ecología 64”. Pp. 9-18.
- (CNA, 2010) CNA, 2010. Estadísticas del Agua en México, edición 2010. Semarnat, Gobierno Federal. Pp. 1-193
- (Nebel y Wright, 1999) Nebel B.J., Wright R.T., 1999. “Ciencias ambientales:ecología y desarrollo sostenible”. Editorial Pearson. 6° Edición. Pp 496
- (Arboleda, 2000) Arboleda V. J., 2000. “Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua”. Editorial Mc Graw-Hill Interamericana, S.A. 3a Edición, tomo I.
- (Manahan, 2007) Manahan Stanley E., 2007. “Introducción a la química ambiental”. Editorial Reverté, S.A. 1ª Edición. pp 233.

- (Romero, 2005) Romero R. A. 2005. Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y principios de diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia.
- (Andía, 2000; Tebbutt, 1999) Andía Cárdenas Y. 2000. Tratamiento de Agua Coagulación y Floculación. SEDAPAL, Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico.

Tebbutt T. H. Y., 1990. “Fundamentos de control de la calidad del agua”, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Birmingham Noriega editores, Editorial Limusa, pp 220-227.

- (DELHAIZE, 1996) Delhaize Emmanuel and Peter R. Ryan Aluminum Toxicity and Tolerance in Plants, Plant physiol 107: 315-321 (1996).
- (Weber, 2003; Andía, 2000). Weber W. J., 2003.” Control de la calidad del agua: procesos fisicoquímicos”. Editorial Reverté S.A. 1a Edición. Pp 569
- (Seoáñez, 2005) Seoáñez Calvo M.2005.” Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo”. Editorial Mundi-Prensa. 1a Edición. Pp 59
- (Jiménez, 2001) Jiménez Cisneros B.E. “La Contaminación Ambiental en México”. Editorial Limusa Noriega Editores, 2001.
- (Manahan, 2007; Ramalho, 1999) Ramalho R.S. “Tratamiento de aguas residuales”. Editorial Reverté S.A. pp 15
- (González, 2002; Nebel y Wright, 1999). González Martínez A.C. y Muñoz Villarreal C. 2002.“ Economía, sociedad y medio ambiente: reflexiones y avances hacia un desarrollo sustentable en México”. Editorial SEMARNAT. Pp 113
- (Metcalf & Eddy, 2000) Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización, México, Mc. Graw Hill.
- (Pnuma, 2008).Pnuma. 2008.”Medio ambiente y desarrollo”. Artículo publicado en Perspectivas Del Medio Ambiente Mundial GEO 4
- (portal.unesco.org/ 2006). portal.unesco.org. 2006.” Crisis del agua: un problema de gobernabilidad, según el segundo Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo”
- (Sánchez, 2006; Nebel y Wright, 1999). Sánchez Bravo A. 2006.” Agua: un recurso escaso”. Editorial Arcibel.

- (www.geografía.laguia2000.com)
- (www.centrogeo.org.mx/internet2/.../intro.htm).
- (Schulz y Okun, 1990). Tratamiento de aguas superficiales para países en desarrollo. Editorial Noriega-Limusa. México.
- (Aldana, 2009) Aldana Gerardo, Bracho Nibis, Fernández Patricia, Galán Douglas, Gutiérrez Edixón. Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales de una procesadora avícola. 2nd IWA Latin-American conference on stabilization ponds.
- (Fernández, 2006). Fernández C., Muñoz H. M. and Ochoa J. R. 2006. Formación de micro emulsiones inversas de acrilamida. Tecnología y desarrollo. Vol. 3.

ANEXOS

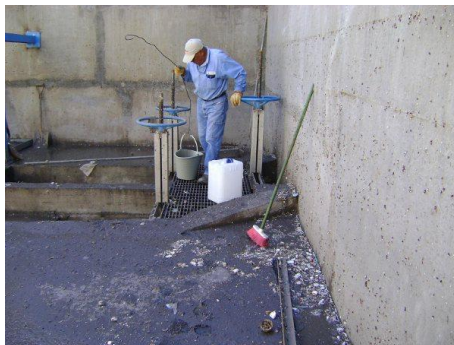


FOTOGRAFÍAS DEL LUGAR DE MUESTREO CEA (AV. 5 DE FEBRERO)

Planta de tratamiento



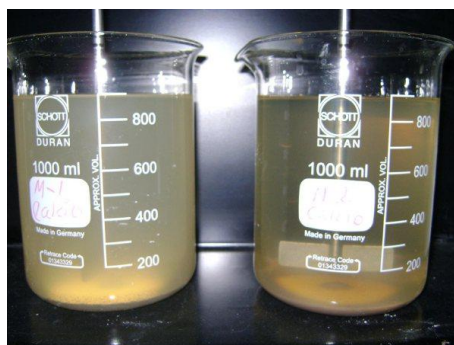
Entrada de aguas negras



Toma de las muestras de agua cruda (aguas negras)



Termino de la prueba de Jarras



Resultado final de la prueba y comparación de agua cruda con tratamiento

