



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**“TRATAMIENTO FÍSICO-QUÍMICO APLICADO AL EFLUENTE DE LA
PLANTA TOLUCA NORTE, PARA LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA
RESIDUAL, CUMPLIENDO CON LA NOM-127-SSA1-1994”.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

P R E S E N T A:

ING. ROSALÍA MARÍA JOSÉ VELÁZQUEZ JIMÉNEZ

DIRIGIDA POR:

DR. EN ING. CARLOS SOLÍS MORELOS

DR. ARTURO COLÍN CRUZ



TOLUCA, MÉXICO: ABRIL 2014.



UAEM | Universidad Autónoma del Estado de México

3° (EV. DE GRADO)
OFICIO NO 155/2014

Toluca, México, 24 de marzo de 2014

**P. DE MAESTRIA EN CIENCIAS AMBIENTALES
ROSALIA MARIA JOSE VELAZQUEZ JIMENEZ
FACULTAD DE QUIMICA
P R E S E N T E**

La que suscribe Directora de la Facultad de Química, dependiente de la Universidad Autónoma del Estado de México, comunica a Usted que el Jurado de su Evaluación de Grado estará formado por:

FIRMA

Dr. Carlos Solís Morelos
PRESIDENTE

[Handwritten signature of Carlos Solís Morelos]

Dr. Humberto Salinas Tapia
SECRETARIO

[Handwritten signature of Humberto Salinas Tapia]

Dr. Arturo Colín Cruz
PRIMER VOCAL

[Handwritten signature of Arturo Colín Cruz]

Dr. Cheikh Fall
SEGUNDO VOCAL

Dr. Daury García Pulido
TERCER VOCAL

Dra. Patricia Balderas Hernández
SUPLENTE

Dra. Araceli Amaya Chávez
SUPLENTE

**ATENTAMENTE
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO
"2014, 70 Aniversario de la Autonomía ICLA-UAEM"**

[Handwritten signature of Guadalupe Ofelia Santamaría González]
**M. en A.P. GUADALUPE OFELIA SANTAMARIA GONZALEZ
DIRECTORA**



**U. A. E. M.
FACULTAD DE QUIMICA
DIRECCION**



c.c.p.Archivo

www.uaemex.mx

Facultad de Química • Paseo Colón Esq. Paseo Toluca • Toluca Estado de México
Tel. y Fax: 217-5109 y 217-3890 • fquim@uaemex.mx

EL PRESENTE TRABAJO SE DESARROLLÓ EN EL CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSO DEL AGUA (CIRA), COMO PARTE DEL PROYECTO N° 2825 DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO (UAEM), CON LA CLAVE N° 2009U. APROBADO COMO PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN EN EL PROGRAMA DE CIENCIAS AMBIENTALES CON EL NÚMERO DE REGISTRO 13/MCA/2010, Y CON EL APOYO DE LA BECA CONACYT (CVU/BECARIO: 328375/231623).

EL PROYECTO SE INSCRIBE EN EL ÁREA DE CALIDAD AMBIENTAL Y EN LAS LÍNEAS DE SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN Y PREVENCIÓN, CONTROL Y EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL DEL PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES.

DEDICATORIA

A Dios

Por su protección, guía y sabiduría que me ha dado siempre.

A mis Padres

Que fueron la amalgama perfecta con las diferencias que tenían entre ellos, para formarme de una forma más completa y desde diferentes puntos de vista. Me hacen falta!!!

A mi hija

Por todo su apoyo y comprensión,
quien es mi razón de vivir y
luchar constante e
incansablemente.

A Chuy mi hermano

Por toda su iniciativa, aportaciones y
guía que he recibido desde niña para
una formación de superación e
integral como persona.

A mis hermanos

Por sus opiniones y cariño que
me dieron en cada momento de mi vida.

A mis compañeros y amigos
por creer en mí y darme ánimos
cuando más falta me hicieron.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Carlos Solís Morelos
Por todos sus consejos profesionales
y como ser humano, así como su apoyo
incondicional en cualquier momento, sobretodo
por permitirme trabajar con él.

A CONACYT
Por todo el apoyo que me brindó
como becaria con el núm. (CVU/BECARIO):
328375/ 231623

A los directivos de la Macro Planta Toluca Norte
por su cooperación y facilidades otorgadas
para el desarrollo de la investigación.

A mis profesores de la facultad de Química y del CIRA
Por los conocimientos compartidos.

Al Dr. Arturo Colín Cruz, la Dra. Patricia Balderas Hernández
y al Dr. Adame, por todo su empeño y paciencia
para que logremos el posgrado.

CONTENIDO

| DESCRIPCIÓN | Pág. |
|---|------|
| Resumen. | 1 |
| 1 Introducción | 2 |
| Marco Teórico | 3 |
| 1.1 Contenido de la materia en el agua cruda | 3 |
| 1.2 Coagulación-floculación | 4 |
| 1.3 Procesos de Coagulación-floculación | 4 |
| 1.4 pH requerido en la coagulación | 6 |
| 1.5 pH Polielectrolitos | 7 |
| 1.6 Gradiente de Velocidad G | 8 |
| 1.7 Recomendaciones para la floculación | 10 |
| 1.7.1 Floculadores | 10 |
| 1.7.2 Tipología de los floculadores | 11 |
| 1.8 Sedimentador de flujo vertical y manto de lodos | 12 |
| 1.9 Filtración rápida | 18 |
| 1.10 Criterios de Diseño | 20 |
| 2 Antecedentes | 25 |
| 2.1 Investigaciones del tema | 26 |
| 2.1.1 Investigaciones recientes sobre tratamiento de agua residual. | 26 |
| 2.1.2 Proyecto de Investigación de la planta piloto. | 27 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 2.1.3 | Planta de Tratamiento Toluca Norte. | 28 |
| 2.2 | Planteamiento del Problema | 30 |
| 3 | Justificación, Hipótesis, Objetivos y Normatividad. | 32 |
| 3.1 | Justificación. | 33 |
| 3.2 | Hipótesis. | 33 |
| 3.3 | Objetivo General. | 33 |
| 3.3.1 | Objetivos particulares. | 33 |
| 3.4 | Normatividad | 34 |
| 3.4.1 | Normatividad del agua de la secretaría del medio ambiente NOM-127-SSA1-1994 | 34 |
| 3.4.2 | Tratamientos para la potabilización del agua por coagulación - floculación de acuerdo a la NOM 127-SSA1-1994 | 35 |
| 3.4.3 | Límites máximos permisibles | 36 |
| 4 | Metodología | 38 |
| | Descripción del <u>Modelo y Metodología</u> . | 39 |
| 4.1 | Descripción del <u>Modelo</u> . | 39 |
| 4.1.1 | Diagrama de flujo. | 39 |
| 4.1.2 | Descripción del modelo semipiloto de laboratorio. | 40 |
| 4.1.3 | Procesos adicionales (Oxidación química y desinfección). | 43 |
| 4.2 | <u>Metodología</u> . | 44 |
| 4.2.1 | Caracterización del agua residual cruda y tratada. | 44 |
| 4.2.2 | Pruebas de tratabilidad en una planta semipiloto de laboratorio. | 44 |
| 5 | Resultados (artículo de investigación). | 45 |
| 6 | Discusión de resultados de los valores y las figuras de los parámetros. | 92 |
| 7 | Conclusiones y sugerencias | 110 |
| | Referencias. | 114 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Valores de G y Gt recomendados para los floculadores. | 12 |
| Tabla 2. Valores de cargas hidráulicas para área cubierta | 15 |
| Tabla 3.- Resultados de eficiencia de los parámetros en el proyecto. | 28 |
| Tabla 4.- Disponibilidad del volumen de agua de las zonas consideradas por la C.N.A | 31 |
| Tabla 5- Disponibilidad de volumen en las cuencas del Balsas, Lerma y Panuco. | 31 |
| Tabla 6. Límites máximos permisibles de contaminantes [NOM-003-ECOL, tabla 1.1997]. | 37 |
| Tabla 7.- Límites máximos permisibles de contaminantes [NOM-001-ECOL, tabla 3.1997]. | 37 |
| Tabla 8. Carga Hidráulica superficial m^3/m^2 día del sedimentador. | 41 |
| Tabla 9. Carga Hidráulica superficial m^3/m^2 día. | 42 |
| Tabla 10. Carga Hidráulica superficial m^3/m^2 día para las columnas del carbón activado. | 43 |

CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1 Velocidad de sedimentación de la partícula a 10° C según la carga hidráulica y su gravedad específica. | 13 |
| Cuadro 2 Valores de los caudales que se están operando. | 18 |
| Cuadro 3 Criterios de diámetro de la grava y el espesor de cada capa. | 21 |
| Cuadro 4 Valores y rangos de diferentes autores. | 22 |
| Cuadro 5 Velocidad ascensional recomendada. | 23 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Rango de diámetro de la materia contenida en las aguas crudas. | 3 |
| Figura 2. Modelo de la capa difusa de Stern- Gouy. | 5 |
| Figura 3. Distancias del sólido. | 5 |
| Figura 4. Floculación ortocinética. | 8 |
| Figura 5. Gradiente de velocidad en un cuerpo de agua (cubo del flujo). | 9 |
| Figura 6. Índices de Willcomb; para clasificar tamaños de floc. | 11 |
| Figura 7. Lateral con orificios y pantallas tranquilizadoras. | 14 |
| Figura 8. Croquis del accesorio de alta tasa de remoción, convencional. | 15 |
| Figura 9. Diagrama de los vectores para el cálculo de la velocidad de sedimentación crítica. | 16 |
| Figura 10 Croquis de la ubicación de las boquillas. | 21 |
| Figura 11. Esquema que representa los dos tipos de flóculos | 27 |

A Flóculo difuso

B Exceso de microorganismos

| | |
|--|----|
| Figura 12 Oxidación en canal, amoniaco nitrificado y después desnitrificado. | 36 |
| Figura 13. Croquis del tanque floculador –alimentador sistema | 40 |
| Figura 14. Equipo PB-700™ PHIPPS&BIRD™ de pruebas de jarras. | 44 |

Resumen

En México hay una gran cantidad de empresas que utilizan y desechan cientos de miles de litros de agua diariamente. Desafortunadamente algunas de estas empresas no cuentan con programas cien por ciento eficientes para el tratamiento de aguas residuales y cuando un afluente de agua residual sin tratar llega a un cauce produce efectos negativos, como los siguientes: se tapiza la vegetación de las orillas con residuos sólidos gruesos que lleva el agua residual, tales como plásticos, utensilios, restos de alimentos, etc.; hay acumulación de sólidos en suspensión sedimentables en fondo y orillas del cauce (arenas y materia orgánica); aumenta el consumo del oxígeno disuelto que tiene el cauce por descomposición de la materia orgánica y compuestos amoniacales del agua residual; se generan malos olores por agotamiento del oxígeno disuelto en el cauce; se fomenta el crecimiento de grandes cantidades de microorganismos entre los que pueden haber elevado número de patógenos; hay contaminación por compuestos químicos tóxicos o inhibidores de otros seres vivos (dependiendo de los vertidos industriales); y aumenta la eutrofización por las grandes cantidades de fósforo y nitrógeno (Mainstone C. y Parr W., 2002).

Debido a la sobre explotación de acuíferos, se pretende que a corto y mediano plazo, tanto en industrias nacionales como en transnacionales, se establezcan programas efectivos para el tratamiento de aguas residuales, y potabilizarla.

Este proyecto considera un sistema semipiloto de laboratorio construido que se encuentra en el Centro de Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), y consiste en un tren de tratamiento que lo componen distintos procesos unitarios, dentro de los cuales están coagulación-floculación; sedimentación; filtro rápido de arena sílica; adsorción con las torres de carbón, y desinfección con una cloración residual.

El efluente con el que se trabaja en este proyecto es municipal y pertenece a la Planta de Tratamiento Toluca Norte, el cual, previamente tratado, cumple con la NOM-001-ECOL-1996, para descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. El proyecto cumplió con las características físico-químicas y bacteriológicas estipuladas por la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para la potabilización de las aguas residuales tratadas, pero el valor del Amonia-N de 0.31 subió a 24.5ppm, siendo que están arriba de las concentraciones máximas permisibles. . En este proyecto, se adicionaron al tren de tratamiento, los siguientes complementos: un aireador y ozonador (ambos con microburbujas), así como rayos U.V.

Abstract

In Mexico, there is a great quantity of industries that use and dispose of hundreds of thousands liters of water per day. Unfortunately, some of these industries don't have 100% efficient programs for waste water treatment at all, thus, when the current of residual water without previous treatment gets to a river, it causes negative consequences as the following: the vegetation beside the rivers gets covered by big solid residuals drawn by the residual water like plastics, utensils, food wastes, etc; there's accumulation of settleable solids in suspension at the bottom and at the bank of the river (sand and organic matter); the consume of dissolved oxygen that has the river increases by means of degradation of organic matter and ammoniac components of residual water; bad odors originate because of the decrease of dissolved oxygen in the river; the growth of big quantities of microorganisms in which there can exist a high number of pathogens is encouraged; there is contamination by toxic chemical compounds or inhibitors of live beings (depending on the industrial wastes; and increases the eutrophication because of the high quantities of phosphorus and nitrogen (Mainstone C. y Parr W., 2002).

Due to the over exploitation of aquifers, it is pretended in short and medium term, in national as well as transnational industries, to establish effective programs for the treatment of residual waters and make it drinkable.

This project considers a constructed semi-pilot laboratory system located at the Interamerican Centre of Water Resources (CIRA), it consists of a treatment system compounded by different unitary processes, in which there are: coagulation and flocculation, sedimentation, sand (silica) filtration, absorption with carbon towers and disinfection with residual chlorination.

The effluent with which we work in this project is municipal and belongs to the Water Treatment Plant in North Toluca. This effluent is previously treated, obeys NOM-001-ECOL-1996, for discharges of residual waters in national properties. The project achieved the physical-chemical characteristics and bacteriological stipulated by the official Mexican norm NOM-127-SSA1-1994 which establishes the maximum limits admissible of contaminants, for the making of drinking water from residual waters, however the value of Amonia-N of .31 increased to 24.5ppm, which is above the maximum allowable concentration. In this project, an aerator and ozonator (both with micro-bubbles), as well as U.V. rays were added into the treatment system.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

1. Marco Teórico.

1.1 Contenido de la materia en el agua cruda.

La fuente de abastecimiento son ríos, presas y pequeños almacenamientos. En los análisis básicos que se deben practicar son: turbiedad, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, sólidos en suspensión fija y volátil, sólidos en solución fijos y volátiles, coliformes; ya que, en función de sus concentraciones se considerara a los procesos para su remoción. La materia contenida en las aguas crudas se clasifica en función de su diámetro ilustrados en la figura 1.

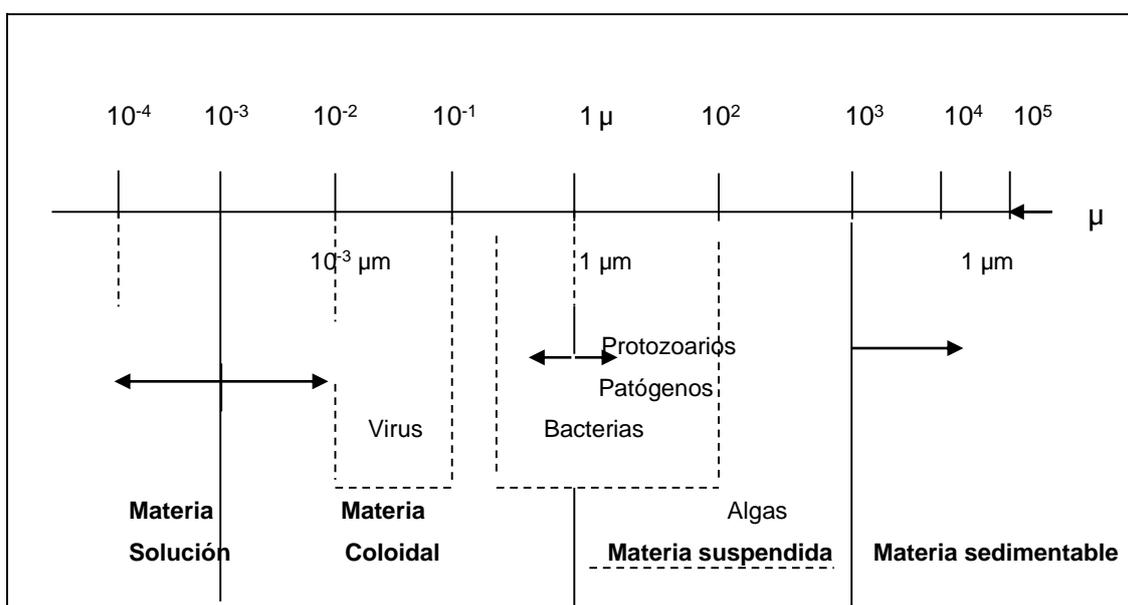


Figura 1. Rango de diámetro de la materia contenida en las aguas crudas (Casey, 1996).

Las fracciones coloidales y solución contenida son las que presentan mayor grado de dificultad para su remoción. La materia suspendida, es la causante de la turbiedad, como arcillas y limos. El color se debe a materia húmica; denominados así, a los ácidos generados por la descomposición de la materia vegetal: de color café a café claro; entre las sustancias húmicas se considera a carbón húmico, ácido fúlvico, ácido himatomelánico. El diámetro de la materia que produce color están en el rango 10⁻³ a 10⁻² micrones, esto es muy cercano en el límite entre materia coloidal y la soluble.

1.2 Coagulación-Floculación.

Para la coagulación se tienen cuatro fenómenos para la desestabilización de los coloides; debido al tipo de características de los reactivos adicionados, que son:

- Comprensión de la doble capa:
Reactivos que forman cationes trivalentes (cargados positivamente), como las sales de aluminio y férricas.

- Neutralización de la carga:
Reactivos para formar cationes, como las sales de aluminio y férricas.

- Partículas puente:
Reactivos con grandes partículas catiónicas, usualmente se utilizan polímeros catiónicos y aniónicos para desestabilizar coloides con cargas negativas.

- Formación de redes:
Los reactivos que generan esta estructura reticular son los hidróxidos y los carbonatos, así mismo las sales de aluminio y hierro, también se pueden lograr hidróxidos de calcio y carbonato de magnesio.

1.3 Proceso de coagulación-floculación

Este proceso se divide en dos fases, la primera denominada coagulación, en la cual se desestabilizan las partículas e inicia la coalescencia de partículas coloidales específicamente los coloides hidrofóbicos. Floculación es el proceso que toma más tiempo, en donde el reactor provoca un movimiento al agua, para facilitar el contacto entre partículas desestabilizadas, con lo que forman otras de mayor tamaño, que en la estructura del sedimentador son separadas por gravedad.

Coagulación tipos de desestabilización

Las partículas coloidales pueden ser estabilizadas y desestabilizadas, la fuerza; que la estabilizan, la carga de la partícula y la hidratación. Los factores de atracción son: a) El movimiento browniano y b) Las fuerzas de Van der Waals.

Los coloides generalmente tienen carga negativa y las partículas coloidales tienen una alta superficie específica (D.N. Thomas, S.J. Judd.) por lo que; su comportamiento está orientado por las propiedades de la superficie, como se observa en la figura 2.

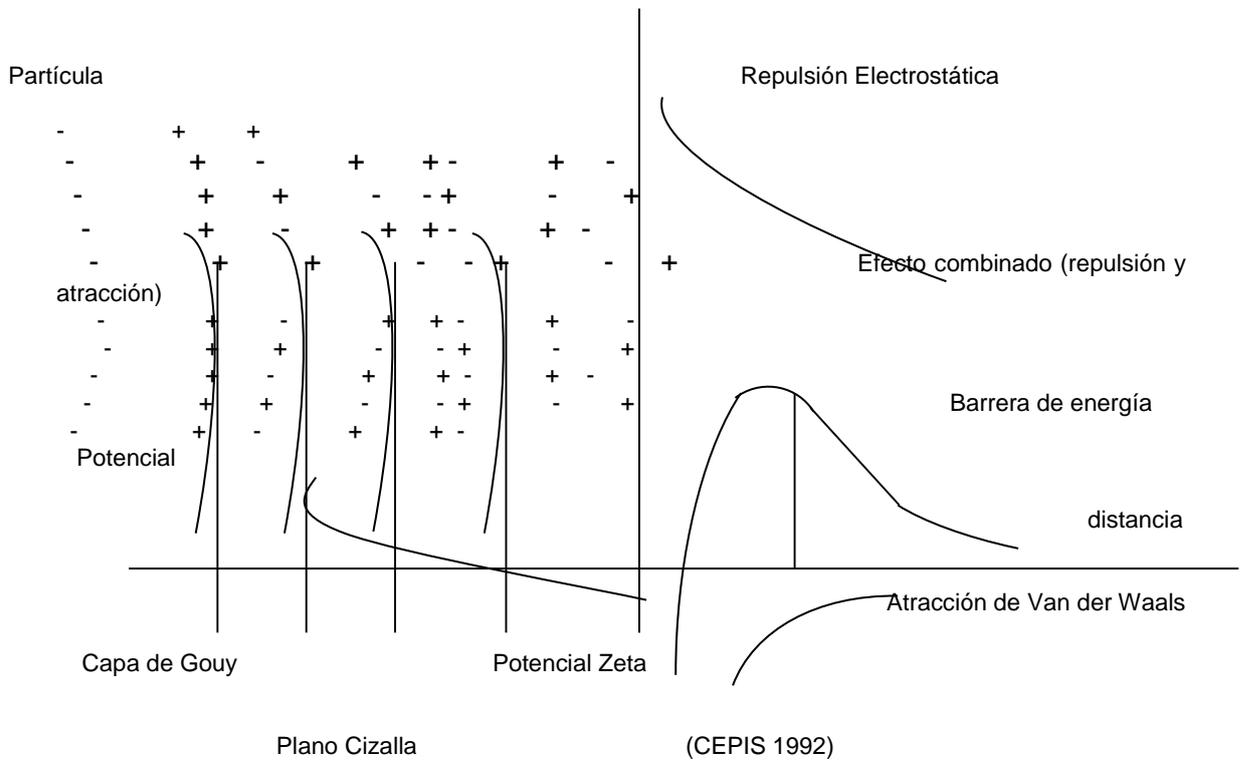


Figura 2. Modelo de la capa difusa de Stern- Gouy.

Los coloides hidrofóbicos, no tienen afinidad por el agua, sus cargas eléctricas tienen preferencia para ser absorbidas por un solo tipo de ion. Las cargas positivas y negativas, hacen que sean envueltas por una doble, capa resultando en un gradiente de la partícula (figura 3).

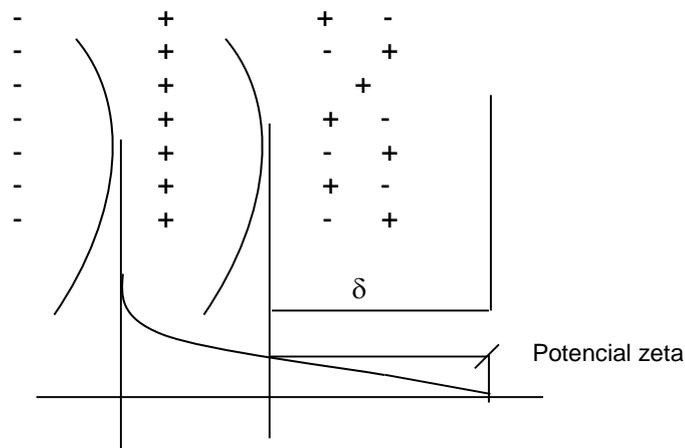


Figura 3. Distancias del sólido

Las partículas es una dispersión coloidal, tiene la misma carga; lo que hace que sean estables por las fuerzas electrostáticas que se hace que se repelen; no actuando, las fuerzas de atracción de una Van der Waals, ni las originadas por el movimiento browniano, no es fácil medir el potencial en la vecindad de la partícula; pero si se puede medir el correspondiente al del plano de cizalla, denominado potencial zeta y se relaciona con la carga de la partícula y el espesor de la doble capa por la expresión:

$$\zeta = 4 \pi \delta q / D$$

δ = Espesor de doble cara

q = carga de la partícula

D = Constante dieléctrica del medio líquido.

π = Constante

El valor del potencial zeta esta en el rango de 10 a 200mV; la coagulación optima se logra cuando el valor es cero (Condición isoelectrico de la suspensión) (T. Casey 1996).

1.4 pH Requerido en la coagulación

El pH, tiene una importancia en la remoción de los metales ya que en un pH dado, el metal esta en solución, lo cual limita su separación. El aluminio tiene una minima solubilidad a un pH aproximado de 7.0; a valores bajos la solubilidad son mas lentos. Sin embargo, se debe considerar; que si la carga de neutralización, es la que rige en el proceso de desestabilización, el pH adecuado puede ser de 5, ya que en este valor predominan los iones con carga positiva.

El hidróxido férrico, tiene una solubilidad mínima (Chris Binnie, Martín Quimber) solubilidad para un rango de pH de 7-10, por lo que estas sales se requieren de menor control de pH.

La alcalinidad de las aguas crudas se desempeña como solución tampón; que evita movimientos bruscos en los valores de pH.

Las sales de aluminio y fierro mas utilizados en el proceso de coagulación son:

Sulfato de aluminio $(Al_2SO_4)_3 \cdot 14 H_2O$

Sulfato férrico $Fe_2(SO_4)_3$

Cloruro férrico $FeCl_3$

Cloruro de polialuminio $Al_x (OX)_y$ y Cl_2

Sulfato silicato de polialumminio $Al_w(OX)_x (SO_4)_y (SiO_2)_z$

Sulfato férrico polimerizado $Fe_x(SO_4)_y$

Los más recientes, denominados generación 2000 son:

Sales de fierro y aluminio polimerizados.- En la década de los 60's, las investigaciones consideraron coagulantes inorgánicos, desarrollando sales de aluminio poliméricas parcialmente hidrolizadas. Estas sales son polímeros inorgánicos con alto peso molecular. Estos coagulantes presentan las siguientes ventajas:

- Son más efectivas a bajas temperaturas.
- Formación rápida de flocs.
- Menor dosis.
- No requieren de sustancias para neutralizar.
- Son más efectivas en la remoción de algas. (Chris Binnie, Martín Quimber 2002).

Estas sales polimerizadas, presentan ventajas, para la operación de la planta potabilizadora hidroautomatizada, ya que evita la adición de cal, que es un problema, como se asienta con facilidad, es necesario disponer de un agitador que la mantenga en suspensión, además de estar dosificada la concentración encontrada en a prueba de jarras, también obstruye los conductos de alimentación hacia el floculador.

1.5 pH Polielectrolitos

Los polímeros son moléculas de cadena larga, son utilizados como ayudas de floculación; los polímeros o polielectrolitos orgánicos deben ser solubles en agua de manera que reaccionen rápidamente con las partículas contenidas en ella. La EPA (Environmental Protection Agency) de los E.U. ha aprobado aproximadamente 600 polímeros que puedan ser utilizados en los sistemas de potabilización; es necesario conocer sus propiedades, para obtener una base en su selección y uso, tales como:

Los polímeros sintéticos pueden ser de manera general: naturales y sintéticos. Algunos polímeros orgánicos obtenidos de algas marinas y de chitosan (Obtenido de Chitin ostras) (Montgomery, J. 1985).

Los polímeros sintéticos pueden ser manejados de manera que se obtenga una variación en el peso molecular; grupos de diferentes cargas, diferente estructura lineal o con ramales.

Los polímeros, cuyo objetivo es desestabilizar partículas y formar flóculos grandes, resistentes y consistentes, también se pueden clasificar por su carga como; aniónicos con

carga negativa, catiónicos con carga positiva no iónicos (neutros) y cuando se utilizan como ayuda de floculación, se recomiendan dosis de 0.1 a 2.0 mg/L. Para obtener el mejor efecto de los polímeros, es necesario, determinar la prueba de jarras, con el agua problema, para determinar el tipo y dosis adecuada de coagulante/floculanta.

1.6 Gradiente de Velocidad G

Los procesos de mezcla rápida y floculación son regidos por el gradiente de velocidad G, y por el número de Camp Gt que considera el tiempo de detención hidráulica, como un factor que influye en el buen funcionamiento de las estructuras, en los cuales tiene lugar. En la mezcla rápida, las partículas contenidas en las aguas crudas se mezclan con los reactivos, cuya concentración se ha optimizado en la “prueba de jarras”. Esta mezcla se da en un tiempo breve, 1 a 10 segundos, una vez desestabilizadas las partículas, el caudal es sometido a un movimiento ligero, que favorezca a el contacto entre partículas para generar la aglomeración, generando partículas mas grandes llamadas flocs; que serán removidos por gravedad en el sedimentador.

En la figura 4, se ilustran las partículas i y j de radios R_i y R_j , las cuales serán atraídas en la distancia $R_i + R_j$.

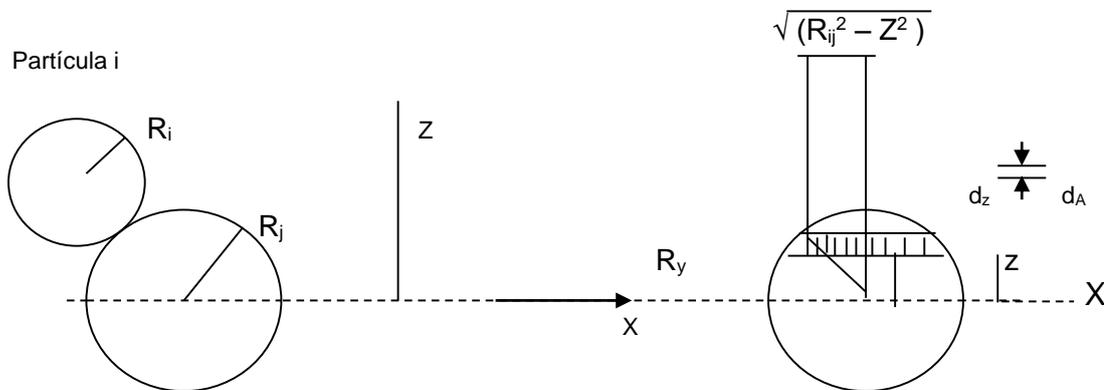


Figura 4. Floculación ortocinética.

El movimiento de una partícula con relación a la otra está relacionada con el movimiento del caudal, ellas pasan a través del área y se expresan de la siguiente manera:

$$dA = 2 \sqrt{(R_{ij}^2 - Z^2)} dz$$

y el caudal que transita en esta área es (Masschelein, 1992):

$$dQ = 3 \frac{d_y}{d_z} 2 \sqrt{(R_{ij}^2 - Z^2)} dz$$

$$Q = 2 \int_0^{R_{ij}} G \sqrt{(R_{ij}^2 - Z_j^2)} 2Z d_z$$

Haciendo $d_v = \frac{G}{D_z}$ se tiene:

$$Q = \frac{4}{3} GR_{ij}^2$$

Si la partícula se encuentra en un flujo laminar, es probable que el número de colisiones este dado por:

$$J = \frac{4}{3} (R_{ij})^3 n_i n_j \frac{d_v}{d_z}$$

n_i = Número de partículas de diámetro i por unidad de volumen.

n_j = Número de partículas de diámetro j por unidad de volumen.

La existencia del gradiente de velocidad en un cuerpo de agua requiere del suministro de una potencia. Considerado un pequeño cubo de flujo con dirección en sentido del eje X y un gradiente en la dirección del eje Z; para condiciones de flujo laminar ($Re < 2,000$), el esfuerzo cortante τ se relaciona de manera lineal con el gradiente de velocidad G.

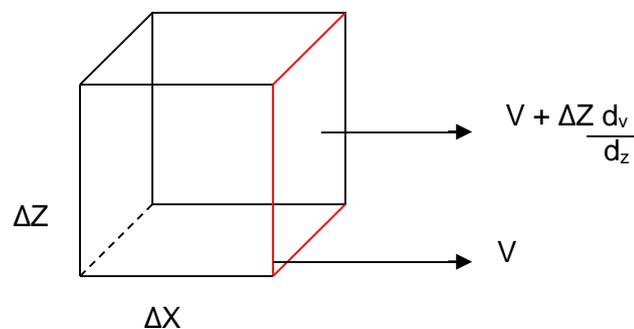


Figura 5. Gradiente de velocidad en un cuerpo de agua (cubo del flujo)

$$\text{Fuerza cortante} \quad \tau = \mu \frac{d_v}{d_z} \quad (\text{Ec.1})$$

$$\text{Fuerza cortante} \quad F = \tau (\Delta X \Delta Y) = \mu \left[\frac{d_v}{d_z} \right] \Delta X \Delta Y \quad (\text{Ec.2})$$

$$\text{Potencia} \quad P = \tau \frac{\Delta Z d_v}{d_z} = \mu \left[\frac{d_v}{d_z} \right]^2 (\Delta X \Delta Y \Delta Z) \quad (\text{Ec.3})$$

$$\text{Potencia / volumen} = P/V = \mu \left[\frac{d_v}{d_z} \right]^2 = \mu G^2 \quad (\text{Ec.4})$$

$$\therefore G = \sqrt{(p / \mu V)} \quad (\text{Ec.5})$$

p = potencia en kg. • m.

μ = viscosidad dinámica.

V = volumen del reactor en m³.

Como:

$$P = \gamma h_1 Q \quad (\text{Ec.6})$$

γ = peso específico del agua.

h_1 = pérdidas de carga m.

Q = caudal en m³.

Se tiene:

$$G = \sqrt{(\gamma h_1 Q / \mu V)} = \sqrt{(p / \mu V)} \quad (\text{Ec.7})$$

Como $\frac{Q}{V} = \frac{1}{t}$ se tiene

$$G = \sqrt{(\gamma h_1 / \mu t)} \quad (\text{Ec.8})$$

1.7 Recomendaciones para la floculación.

En la práctica se ha encontrado que la mayor eficiencia en la aglomeración de partículas desestabilizadas, se logran con valores de G en el rango de 40 a 80 s⁻¹ y para el número de Camp en el rango de 60,000 a 100,000; los valores anotados corresponden a valores de 20-30 minutos; las experiencias del Director de este trabajo se han determinado los valores de 7 -10 minutos, por lo que bajan los valores recomendados, de $G \tau$ estarían en el orden de 20,000 a 30,000.

1.7.1 Floculadores.

Una vez desestabilizadas las partículas; proceso denominado coagulación. En la unidad de floculación se deberá considerar los aspectos siguientes (CEPIS, 1992).

- 1.- La forma de producir la agitación.
- 2.- El valor de gradiente de velocidad.
- 3.- El tiempo de detención.

Los objetivos que se persiguen en la cámaras floculadoras son los siguientes:

- a) reunir los micros flóculos, para formar partículas de mayor tamaño y que puedan ser separadas en el sedimentador.
- b) Compactar el floc, esto es que sea más denso, con lo que se tendrá mayor eficiencia en la remoción de ello, (CEPIS 1992).

El tamaño del floc se hace de manera visual; la clasificación se hace conforme a los índices de Willcomb (CEPIS Manual III Teoría 1992).

El diseño del floculador de la planta piloto se muestra el procedimiento para el cálculo del gradiente G y al número del Camp Gt.

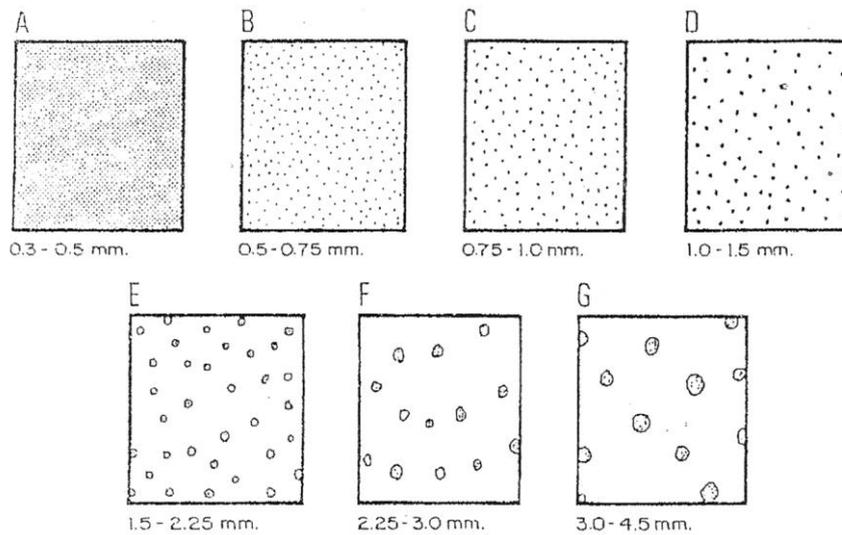


Figura 6. Índices de Willcomb; para clasificar tamaños de floc.

1.7.2 Tipología de los Floculadores

Los floculadores se pueden clasificar en:

- a) Mecánicos
 - a) Rotatorios
 - b) Reciprocantes
- b) Hidráulico
 - a) Flujo horizontal
 - b) Flujo vertical
 - Pantallas
 - Orificios
 - Codos de 90°
 - c) Flujo helicoidal
 - Modelo UNAM
 - Modelo Eli de Gortari
 - Modelo UAEM (Solís)

(No se presentan los principios de los floculadores mecánicos e hidráulicos, por no corresponder a este trabajo).

Floculadores hidráulicos de flujo helicoidal-vorticosos (Modelo UAEM Solís), consiste en una estructura cilíndrica, alimentada en el centro por una tubería principal, la cual se divide en dos ramales, paralelos al perímetro del fondo del cilindro, pueden funcionar con flujo ascendente o flujo descendente; al final de los dos ramales, se deja una, tramo roscado; a la cual se le colocan tapas roscadas con un orificio central de manera que se genere en la estructura, un gradiente de aproximadamente 50 s.

Con el juego de orificios se puede controlar un gradiente en el rango de 20-60 s⁻¹.

Con esto se utiliza la fuerza rotacional de la tierra (Flujo vorticoso) y la velocidad del agua (flujo helicoidal).

En lo referente, al tiempo de detención y el número de Camp se modifican, lo que hacen necesario que la teoría acerca de estos conceptos tiene que ser revisada.

Para floculadores se recomiendan los siguientes valores de G y Gt. (En el diseño del floculador de la planta piloto se muestra el procedimiento para el calculo del gradiente G y al número de Camp Gt.)

Tabla 1. Valores de G y Gt recomendados para los floculadores.

| PARAMETRO | t min. | G (s-1) | Gt |
|----------------------------|--------|---------|-----------------|
| *Convencional | 20-30 | 50-100 | 100,000-150,000 |
| Remocion, color y turbidez | | | |
| Kawamura | 20-70 | Oct-70 | 10,000-126,000 |
| UAEM (Solís) | 07-Oct | 36-65 | 15,000-39,000 |

*Water Tretament Plant Design AWWA

1.8 Sedimentador de Flujo Vertical y Manto de Lodos.

El floculador es la principal estructura del sistema de potabilización, ya que en el tiene lugar la aglomeración de partículas; las cuales son mas densas que el agua y tienden a ser separadas por gravedad; si bien en el floculador se tiene el proceso de aglomeración y la formación de flocs, en el manto de lodos del sedimentador con una alta concentración de partículas desestabilizadas; en el cual se tiene contacto con los blocs procedentes del floculador; incrementado su dimensión, en realidad funciona como un complemento, o ampliación del proceso de floculación, así se ha observado el incremento de los flocs.

Únicamente los flocs ligeros y pequeños son los que escapan del manto; que posteriormente se remueven en el modulo de alta tasa de remoción, y en el filtro.

Según Kawamura la velocidad de sedimentación de las partículas en función de las cargas hidráulicas y su gravedad se anotan en el cuadro 1 (m^3/m^2 día).

Cuadro 1: Velocidad de sedimentación de la partícula a 10° C según la carga hidráulica y su gravedad específica.

| Tipo de partícula | δ | DIMENSION mm | V de Sed. mm/s | CARGA HIDRAULICA m^3/m^2 día |
|-------------------|----------|--------------|----------------|--------------------------------|
| Arena | 2.65 | 1.0 | 100.0 | 8640 |
| Arena | 2.65 | 0.4 | 42.0 | 3624 |
| Limo | 2.65 | 0.2 | 21.0 | 1824 |
| Limo | 2.65 | 0.1 | 8.0 | 696 |
| Limo y arcilla | 2.65 | 0.03 | 6.0 | 528 |
| Limo y arcilla | 2.65 | 0.04 | 2.1 | 180 |
| Arcilla | 2.65 | 0.01 | 0.154 | 13 |
| Floc aluminio | 1.001 | 1 a 4 | 0.2-0.9 | 17-79 |
| Floc cal | 1.002 | 1 a 3 | 0.4-1.2 | 36-103 |

Los sedimentadores de flujo vertical presentan las ventajas siguientes:

- 1.- No se presenta estratificación térmica; debido a que la alimentación es continua, la que tiende a uniformar la temperatura en el tirante del agua.
- 2.- La alimentación, se puede utilizar en su totalidad el área del fondo; con una distribución uniforme. (solo un mal diseño en la alimentación puede provocar circuitos cortos).
- 3.- Los blocs, tienen un tiempo de detención mayor al hidráulico ya que su velocidad reales la diferencia entre la velocidad de sedimentación de la partícula y la velocidad ascendente del flujo.
- 4.- La zona de salida, puede cubrir, según el diseño, la superficie superior coadyuvando a generar un flujo uniforme y disminuir el circuito corto.

El sedimentador de flujo vertical con accesorios de alta tasa de remoción esta compuesta de las partes siguientes.

a) Zona de alimentación.- consiste en una tubería principal con ramales los que llevan orificios con un ángulo de 90°, como se ilustra croquis de la figura; esto permite una distribución uniforme del influente.

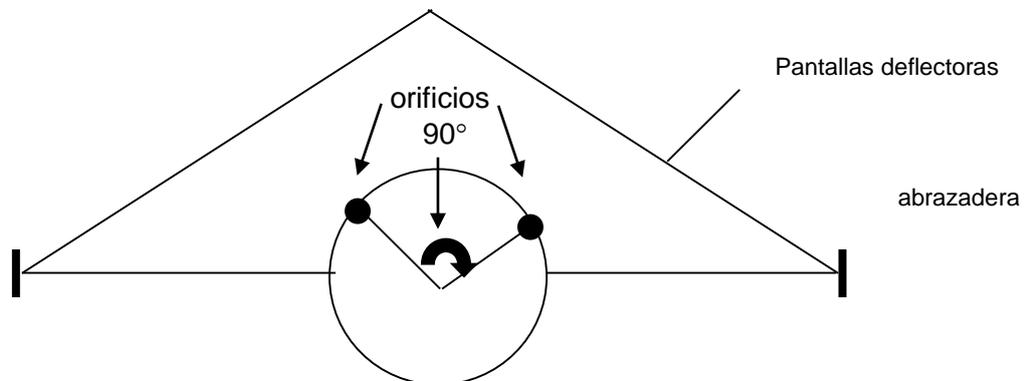


Figura 7. Lateral con orificios y pantallas tranquilizadoras.

b) Zona de lodos.- es un estrato con alta concentración de partículas desestabilizadas, que producen el crecimiento de los blocs provenientes del floculador, al hacer contacto entre ellas.

El espesor recomendado esta en el rango de 1.20-3.00m.

Al final del manto de lodos, se considera una tolva para los lodos excedentes, colectados por una tubería troncal y laterales. La tubería principal se conecta una válvula ubicada en el exterior de la estructura; que por gravedad los lodos son extraídos.

c) Zona de sedimentación.- que comprende el espacio comprendido entre la parte superior del manto de lodos y el final del accesorio de alta tasa de remoción.

Cargas hidráulicas.- es un parámetro diseño kawamura sugiere carga hidráulicas en el rango de 90-180 m³/m² día.

CEPIS sugiere cargas de 60 a 180 m³/m² día, para el primer caso y de 45 m³/m² día para la segunda sugerencia; cuando se tiene varios valores considerar las medias para ambos rangos y considerar la media de los valores.

Para el área cubierta por los accesorios de alta tasa de remoción se sugieren los valores que se encuentran en las cargas hidráulicas.

1.8.1 Cargas Hidráulicas

Tabla 2. Valores de cargas hidráulicas para área cubierta

| AUTOR | CARGA HIDRAULICA SUPERFICIAL m ³ /m ² día |
|----------------------|---|
| Susuma Kawamura | 90-180 |
| CEPIS | 60-180 |
| Willy J. Masschelein | > de 480 |
| UAEM (Solís) | 40-140 |

Considerando los valores medios:

| | |
|--------------|---|
| CEPIS | CH=120 m ³ /m ² día |
| Kawamura | CH=135 m ³ /m ² día |
| Masschelein | CH=120 m ³ /m ² día |
| UAEM (Solís) | CH=90 m ³ /m ² día |

Para el análisis de la remoción de flóculos en el accesorio de alta tasa de remoción; eligiendo una geometría comercial, se tiene

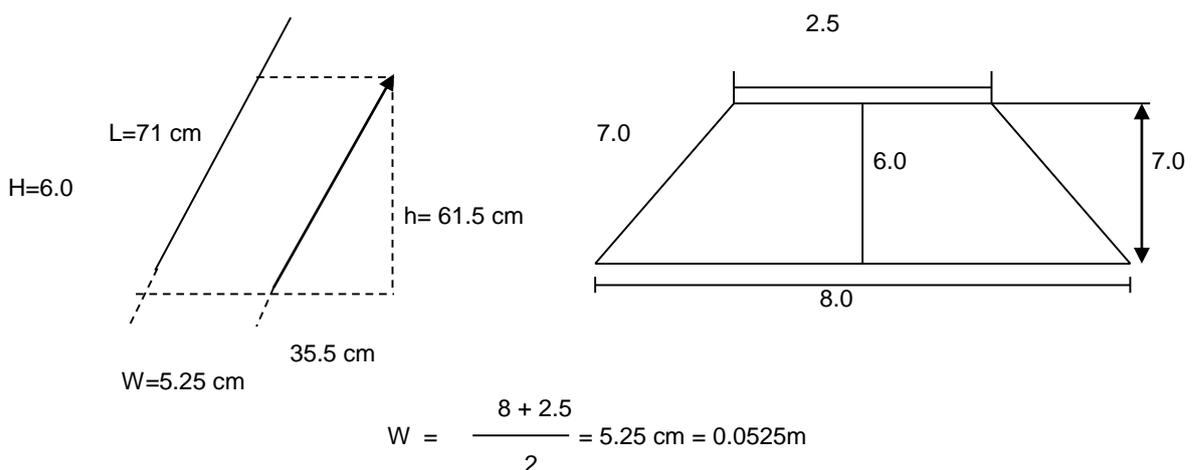


Figura 8. Croquis del accesorio de alta tasa de remoción, convencional.

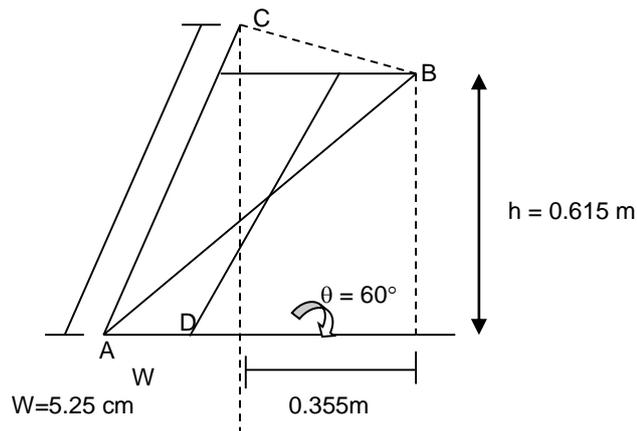


Figura 9. Diagrama de los vectores para el cálculo de la velocidad de sedimentación crítica.

Las partículas con velocidad de sedimentación crítica V_s ; recorre la trayectoria \overline{CD} ; en el sentido vertical Υ con la velocidad de V_n en el sentido de las placas. Descomponiendo el vector resultante \overline{AB} en los componentes \overline{AC} y \overline{CD} ; el tiempo para recorrer la distancia \overline{AB} es t . El vector \overline{AC} es recorrido por la partícula con velocidad v_n en el tiempo t ; y, el vector \overline{CD} es recorrido con la velocidad v_s en el mismo tiempo t .

El segmento \overline{AC} es:

$$\overline{AC} = \frac{h}{\text{Sen } \theta} + \frac{w}{\text{Tan } \theta} = v_h t$$

$$\therefore v_h = \frac{\frac{h}{\text{Sen } \theta} + \frac{w}{\text{Tan } \theta}}{t}$$

El segmento \overline{CD} es:

$$\overline{CD} = \frac{w}{\text{Cos } \theta} = v_s t$$

$$\therefore v_h = \frac{\frac{w}{\text{Cos } \theta}}{T}$$

$$V_s = \frac{V_d}{A} \cdot \frac{w}{h \cos \theta + w \cos^2 \theta}$$

$$V_d = Q \cdot 86,400 \text{ Q en m}^3 / \text{s.}$$

$V_d =$ Volumen diario en $\text{m}^3 / \text{día}$.

$A =$ Área en m^2

$h =$ altura del accesorio de alta tasa de remoción en m.

$w =$ separación entre placas en m.

$$V_h = \frac{V_d}{A \text{ sen } \theta}$$

$V_d =$ Volumen diario.

Estas ecuaciones serán utilizadas, en el cálculo de la planta piloto.

El número de Reynolds se obtiene por la expresión:

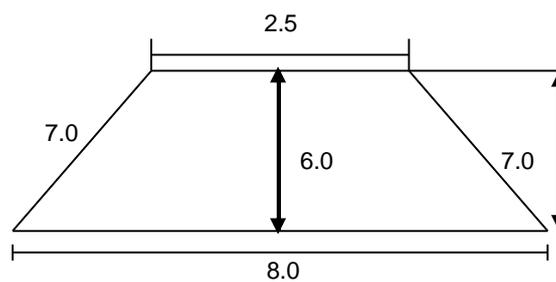
$$R_e = \frac{VR_h}{\gamma} \leq 20$$

$V =$ velocidad en el accesorio de alta tasa de remoción.

$$R_h = \text{radio hidráulico} = \frac{A}{p}$$

$\gamma =$ viscosidad cinemática

Para la sección comercial, adoptada se tiene:



$$A = \frac{0.025 \times 0.08}{2} \times 0.06 = 0.00315 \text{ m}^2$$

$$P = 0.025 + 0.08 = 2 \times 0.07 = 0.245 \text{ m}$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{0.00315}{0.245} = 0.0129$$

Para los casos de los caudales que se están operando, se tienen los valores del siguiente cuadro:

Cuadro 2: Valores de los caudales que se están operando.

| Q m ³ /s | Vd m ³ /día | Am ² x sen 60° | Vo m/s | Carga hid. m ³ /m ² día | Rh | Re |
|---------------------|------------------------|------------------------------|---------|--|--------|-------|
| 0.00015 | 13.82 | 0.164 | 0.00098 | 84.27 | 0.0129 | 10.99 |
| 0.00020 | 17.28 | 0.164 | 0.00122 | 105.36 | 0.0129 | 13.68 |
| 0.00025 | 21.60 | 0.164 | 0.00153 | 131.71 | 0.0129 | 17.16 |

1.9 Filtración rápida

Tiene por objeto retener los flocs finos y de baja densidad que escapan del sedimentador; así como la remoción de microorganismos patógenos, virus y algas contenidos en las aguas superficiales contaminadas.

Los procesos que forman lugar en la remoción de la materia, en el medio filtrante se debe a: (Massechelein, 1977, A. sincero 2003)

- a) Cernido
- b) Sedimentación
- c) Acción centrifuga
- d) Difusión
- e) Atracción o efecto de las fuerzas de Van der Waals
- f) Atracción electrostática

a) Cribado:

Se debe a la intercepción de las partículas mayores que los espacios, entre granos del medio; teniendo influencia la porosidad, de la forma del grano. La porosidad varia con el tiempo, ya que la materia retenida la disminuye; además parte de la materia ocupa los poros y engruesa el diámetro del medio.

Para granos de 1-1.2 mm de diámetro, la porosidad esta en el rango de 40-50% del volumen.

b) Sedimentación en el medio filtrante:

La sedimentación de una partícula esta dada por la expresión general de la velocidad de descenso:

$$V_s = \sqrt{(4/3) \cdot (g/Cd) \cdot ((l_s-l)/l) \cdot d}$$

El número de Reynolds es:

$$Re = \frac{V_s d}{\gamma}$$

El coeficiente de fricción de Newton, se obtiene por la expresión:

$$Cd = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34$$

Cuando Re esta en el rango de $10^{-4} - 1.0$ se tiene la ley de Stokes.

$$Cd = \frac{24}{Re} \quad y \quad V_s = \frac{1}{18} g \left(\frac{l_s-l}{l} \right) d^2$$

Cuando Re esta en el rango de 10-1000 se tiene la ley de Allen y $Cd = \frac{12.5}{Re^{0.5}}$

Cuando Re esta en el rango de 1000 – 250,000 se tiene la ley de Newton.

$$Cd = 0.4 \quad y \quad V_s = 1.82 \sqrt{g \cdot ((l_s-l)/l) \cdot d}$$

La expresión de Stokes es para flujo laminar, la de Newton para flujo turbulento y la de Allen para flujo en transición.

c) Acción centrifuga:

La dirección del flujo, en el medio filtrante, no es lineal; es errático y siguiendo de la trayectoria de los espacios, que siguen las partículas; en este cambio de dirección; es factible acceder a una zona muerta, donde se depositan.

d) Por difusión:

Es generada en una dimensión pequeña por el movimiento browniano que conjuntamente con la agitación incrementa la posibilidad de contacto entre las partículas y posteriormente el medio filtrante.

e) Atracción de masa:

Se debe a la fuerza de Van der Waals las que contribuyen al transporte y fijación de las partículas al medio de empaques, debido a su pequeñas distancia de influencia; en el rango de r^{-6} a r^{-12} , y considerando que r es pequeña; lo que no es significativa en el proceso de filtración.

f) Atracción electrostática:

La arena que es usualmente; el medio filtrante tiene carga negativa; lo que hace que aquellas partículas con carga positiva se adhieran al medio. La carga negativa, del medio favorece la precipitación de carbonos e hidróxidos de hierro y aluminio; contenidos en los micros flocs que escapan del sedimentador. Se tiene que con el tiempo el grano de arena se cubre de una película de materia lo que hace que cambie la carga de negativa a positiva.

El medio es más eficiente, cuando se tiene el punto iso eléctrico.

g) Fijación por efectos magnéticos:

Un alto porcentaje de partículas no son magnéticas, para mejorar este aspecto se puede adicionar al agua a ser tratada, como $Fe_2 O_4$; lo que hace que el 5% de la superficie especifica, tenga una filtración eficiente; y, resulta adecuada para la remoción de bacterias y virus.

1.10 Criterios del diseño

Las principales recomendaciones para el diseño de filtros rápidos de arena son:

- a) Espesores del medio filtrante y soporte
- b) Carga hidráulica
- c) Caudal de retrolavado (velocidad ascendente)
- d) Altura
- e) Obras accesorias.

a) Espesores del soporte del medio filtrante:

El medio filtrante consiste en arenas sílicas de 0.95 mm a 1.0 mm de diámetro, para impedir que accedan a las boquillas ranuradas, colocadas en la losa, entre el falso fondo y el material pétreo, es necesario, colocar capas de grava y gravillas de manera descendente de la losa hacia la parte superior. Se tienen varios criterios. En el cuadro se anotan las más utilizadas.

Cuadro 3: Criterios de diámetro de la grava y el espesor de cada capa.

| CAPA | DIAMETRO Criterio Europeo | ESPESOR | CEPIS | ESPESOR |
|------|------------------------------|---------|---------------|------------|
| 1" | 1.5" – ¾" | 15cm | 2" - 1 ½" | 15 cm |
| 2" | ¾" – ½" | 7.5 cm | 1½" – ¾" | 7.5 cm |
| 3" | ½" – ¼" | 7.5 cm | ¾" – 1/2" | 7.5 cm |
| 4" | ¼" – 3 mm | 7.5 cm | ½" – 3/6" | 7.5 cm |
| 5" | 3 mm – 1.7 mm | 7.5 cm | 3/16" – 3/32" | 7.5 cm |
| 6" | Arena 60 – 75 cm | 7.5 cm | | 60 – 75 cm |

Boquillas en el fondo, empotradas en la losa del falso fondo:

Conjuntamente con los lechos de grava y gravillas tienen como objeto; distribuir uniformemente el agua de retrolavado; los hay de diferentes tipos; son diferentes, según los proveedores son cilíndricos, con diámetro aproximado de 3 – 3.5 cms; altura de 3 – 4 cms, ranuras verticales de 0.5 mm, o bien orificios en la pared vertical con diámetro de 1.0 – 1.5 mm, estos se enroscan a un miple de ½" o ¾"; ahogados en la losa el croquis ilustra lo anotado.

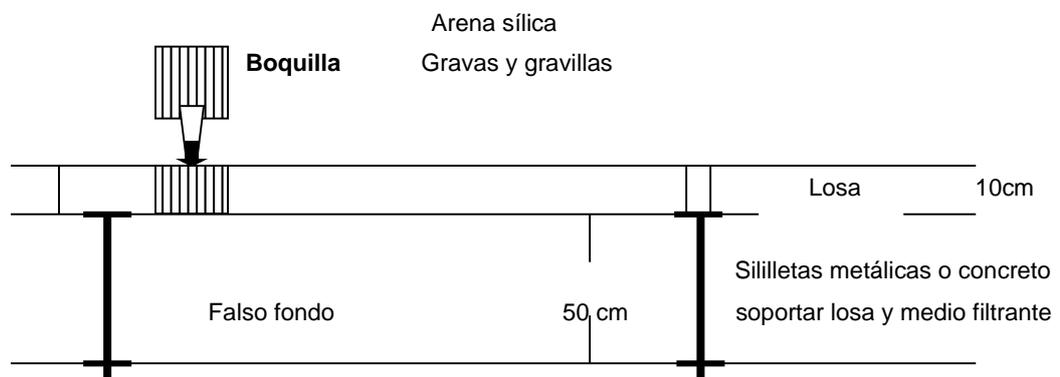


Figura 10. Croquis de la ubicación de las boquillas.

b) Carga hidráulica:

Es un parámetro de diseño, que define el área horizontal del filtro, que es variable; algunos diseñadores consideran un factor de seguridad para cuando se presente incremento de caudal; aunque esta no es la solución, ya que se puede llegar a un estado de subdiseño; en el cuadro 4, se muestran valores propuestos por diferentes autores.

Cuadro 4: Valores y Rangos, de diferentes autores

| AUTOR | RANGO DE CARGAS HIDRAULICAS m ³ /m ² día |
|----------------------|---|
| Susuma Kawamura | 120 -180 |
| CEPIS | 80 -175 |
| Willy J. Masschelein | 60 -240 |
| Casey | 120 -240 |
| Binnie | 140 -190 |
| A. Sincero | 100 – 200 |
| Media | 104 – 204 |
| δ_{n-1} | 28.7 – 29.0 |

Nota: Se recomienda seleccionar los anotados en el rango inferior.

c) Caudal de retrolavado:

Los flocs ligeros y pequeños, que salen del sedimentador son retenidos en el medio filtrante, algunas ocasiones logran salir en el efluente del filtro; con el tiempo, dependiendo del funcionamiento del sedimentador; colmatan al medio, principalmente en la parte superior; lo que impide el flujo a través del filtro, esto hace necesario, introducir un caudal por la parte inferior, de manera que se obtenga un 15 – 20% de expansión del estrato de arena; este caudal denominado de retrolavado, provoca una turbulencia, que hace que los granos rocen entre si; desprendiendo la materia retenida y reintegrando la porosidad original.

El tiempo para realizar el retrolavado (carrera del filtro) es variable y depende principalmente del buen o mal funcionamiento de los procesos de floculación y sedimentación. También es dependiente de la calidad del agua cruda y de las variaciones de las concentraciones de materia suspendida, por esto no es posible recomendar los tiempos de las carreras del filtro; pues son variables que no se pueden evaluar en un modelo, cuenta la experiencia de los operadores.

Algunos autores anotan la duración de la carrera del filtro, este, para un caso específico, se obtiene de manera empírica, siendo el indicador principal, la elevación del tirante del agua y posteriormente el derrame de la misma.

Los autores consideran como periodos de limpieza, según la carga hidráulica, así la CEPIS considera periodos de 24-48 y 72 horas, para cargas hidráulicas de 176-118 y 880 m³/m² día.

La velocidad ascensional recomendada por algunos autores se anotan en el cuadro siguiente:

Cuadro 5: Velocidad ascensional recomendada

| AUTOR | VELOCIDAD ASCENDENTE m/min |
|-----------------|----------------------------|
| CEPIS | 0.8 – 1.20 |
| Susuma Kawamura | 0.6 – 0.74 |
| Media | 0.7 – 0.92 |

El tiempo de retrolavado recomendado esta en el rango de 5 – 20 minutos.

d) Altura del filtro:

Se debe considerar las alturas anotadas correspondientes al falso fondo, capas de grava y de gravilla y el espesor del medio filtrante, arena; según las recomendaciones anotadas, y , sobre la superficie de la arena un tirante de agua de 1.20m

e) Obras accesorias son las siguientes:

1.- Canaleta colectora del agua de retrolavado con una disposición que cubra proporcionalmente la salida del agua de retrolavado, que deberá repartirse uniformemente en la secciona horizontal del filtro. Estas canaletas se calculan para captar el caudal de retrolavado.

2.- Cámara de colección del flujo de las canaletas: se contemplan una tolva en que cubra el ancho del filtro y en la cual descargan los caudales de cada canaleta. Esa cámara, esta controlada por una válvula colocada en el exterior, la pendiente del fondo, debe ser hacia la salida, con el objeto de evitar el sedimento de partículas en ésta.

3.- Tanque de agua tratada para el retrolavado: Se debe disponer de un almacenamiento de agua tratada con un volumen capaz de proveer el caudal de retrolavado por el tiempo que dure este. Se utiliza la expresión:

$$\text{Vol. Tanque} = Q \text{ retrolavado} \times \text{tiempo de retrolavado} \cdot N; \quad N = \text{No. de filtros}$$

CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

2 Antecedentes

2.1 Investigaciones del Tema

2.1.1 Investigaciones recientes sobre tratamiento de agua residual.

En la búsqueda para sanear el agua se ha encontrado que las bacterias, especialmente las filamentosas, microorganismos capaces de degradar sustancias tóxicas y contaminantes del agua mejorando sus características y en muchos casos volviéndola potable nuevamente (López-Archilla A. et al., 2001; Oron G. et al., 2002). Estos microorganismos son en su mayor parte bacterias heterótrofas, es decir, bacterias que utilizan contaminantes orgánicos como alimento para formar biomasa celular nueva y posteriormente reproducirse (Inglis G. et al., 1999; Grant W. 2004;). Si bien la mayor parte de las bacterias que forman la biomasa que depura el agua residual en el tratamiento biológico tiene forma unicelular, hay algunos microorganismos que presentan sucesiones celulares que parecen filamentos (bacterias filamentosas) (Górny R., 2004; Lopez-Archilla A. et al., 2001).

Las bacterias son bio-reductores y su papel ecológico indispensable para la degradación de materia orgánica permite la estabilización de residuos orgánicos existentes en las plantas de tratamiento (Thompson G. y Forster C., 2003). A este proceso de saneamiento utilizando bacterias se le ha llamado biosaneamiento o depuración biológica (Margalef R. 1983; Suárez J. et al., 1993).

Los objetivos de una depuración biológica del agua son: eliminar residuos, aceites, grasas, flotantes, arenas, etc. Para evacuar el líquido a un punto de destino final adecuado. Se pretende eliminar las materias decantables orgánicas o inorgánicas, así como los compuestos amoniacales y que contengan fósforo. Y finalmente, transformar los residuos retenidos en fangos estables y que éstos sean correctamente dispuestos (Jiménez C. et al., 2001).

Las determinaciones analíticas que siempre se usan en una depuradora para conocer el grado de calidad de su tratamiento son: sólidos en suspensión o materias en suspensión (materias sólidas de tamaño superior a 1 μm independientemente de que su naturaleza sea orgánica o inorgánica), Demanda Biológica o Bioquímica del Oxígeno (DBO, mide la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos del agua para estabilizar ese agua residual en un periodo normalizado de 5 días), Demanda Química de Oxígeno (DQO, es el oxígeno equivalente necesario para estabilizar la contaminación que tiene el agua), cantidad de nitrógeno (formas amoniacales), nitrógeno orgánico, nitratos y nitritos, determinación de fósforo (fósforo total u orto-fosfato disuelto) (APHA, AWWA, WPCF, 1992; Leal A. et al., 2002; Oron G. et al., 2004).

La depuración biológica del agua se lleva a cabo por enormes cantidades de microorganismos que se agrupan en flóculos (pequeñas esferas) dentro de un reactor o unidad de saneamiento (Lopez-Archilla A. et al., 2001). Los filamentos de los microorganismos filamentosos generalmente forman estructuras de flóculo difuso o estructura abierta (Figura 11A) que se pueden reconocer porque no se observan los flóculos nitidos y las bacterias formadoras de flóculos crecen sobre una malla de bacterias filamentosas. Cuando se observa la presencia de niveles elevados de microorganismos filamentosos se observan flóculos de aspecto más o menos redondeado (Figura 11B) de los que salen filamentos que parten hacia los otros flóculos produciéndose enlaces o puentes entre los flóculos (Eikelboom, D., 1975; Lopez-Archilla A. et al., 2001).

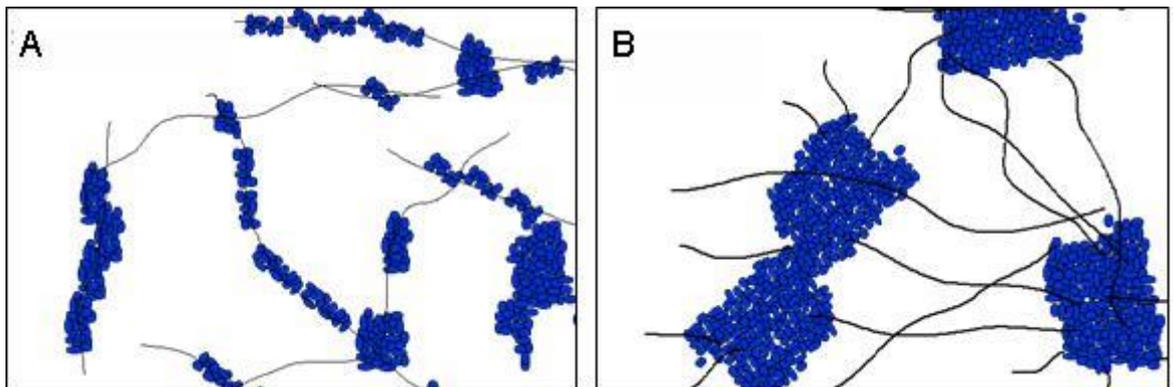


Figura 11. Esquema que representa los dos tipos de flóculos que se forman entre microorganismos filamentosos. A, se muestra un flóculo de estructura abierta o también llamada de flóculo difuso. B, cuando hay un exceso de microorganismos se presentan enlaces o puentes entre los flóculos formando mallas más complejas.

2.1.2 Proyecto de Investigación de la planta piloto.

En el proyecto de investigación Clave UAEM 1966/2004-2 se realizaron corridas experimentales en una planta piloto ubicada en los laboratorios de Modelos Hidráulicos del CIRA. Esto se realizó con el objetivo de ver las eficiencias del sistema. Los resultados de los parámetros para evaluar la planta piloto se anotan en la tabla 3.

Tabla 3.- Resultados de eficiencia de los parámetros en el proyecto.

| Parámetro | Eficiencia % |
|-------------|--------------|
| Turbidez | 99.7 |
| Color | 82.4 |
| SST mg/L | 99.6 |
| DQO mg/L | 100% |
| E. Coli | 100% |
| SSV mg/L | 98.8 |

Estos resultados, nos indican, que utilizando procesos avanzados, es factible lograr la potabilización del efluente.

2.1.3 Planta de Tratamiento Toluca Norte

En el marco del programa Integral para la recuperación del Río Lerma, iniciado en 1989, el Gobierno del Estado de México lleva a cabo la construcción de 30 plantas para el tratamiento de unos 3500 lps de aguas residuales generadas en 32 municipios, en los cuales viven cerca de dos millones de habitantes. En este esfuerzo, destaca el Proyecto Integral de Saneamiento del Área Metropolitana de la Ciudad de Toluca y dentro de el, la construcción de dos macroplantas que fueron puestas en operación en noviembre de 1994.

Las macroplantas atienden a los municipios de Toluca, Metepec, Lerma y San Mateo Atenco, cuya población conjunta asciende a 740 mil habitantes. Estos municipios generan cerca de 1800 lps de aguas residuales que al no ser tratadas, originaban serios problemas ambientales y de salud. Este caudal representa el 60% del total que conduce el río Lerma en esta zona.

La Planta de Tratamiento Toluca Norte sirve al casco urbano de la ciudad, en beneficio de 490 mil habitantes; se ubica en el margen derecho de río Verdiguél, en un terreno de 16 hectáreas dentro de la propiedad conocida como Rancho San Blas, en el camino a Villa Cuauhtemoc. La planta tiene una capacidad inicial de 1250 L/s, la cual podrá ampliarse hasta 2000 L/s, de acuerdo con el crecimiento del área metropolitana y del

incremento en los niveles de cobertura del servicio de alcantarillado. Para conducir las aguas residuales hasta el sitio de la planta y sanear su zona de influencia, fue necesario construir el colector Toluca Norte de 9.7 kilómetros de longitud, con tuberías de concreto reforzado de 1.8 de diámetro.

Toluca Norte es una planta de tipo dual o combinado, cuya variante de filtros rociadores-tanques de contacto de sólidos permite obtener efluentes de excelente calidad, con bajos consumos de energía. Es por ello que este tipo de plantas, de tecnología reciente, ha proliferado en poco tiempo. Antes de iniciar el proceso biológico dual, las aguas residuales reciben un pretratamiento que permite suprimir el uso de sedimentadotes primarios. Al pasar a través de rejillas de desbaste grueso, seguido de cribas finas de limpieza mecánica, el agua residual queda libre de sólidos mayores de 6 milímetros. Posteriormente, pasa a unos desarenadores de diseño moderno denominado, vértice y después a un cárcamo de bombeo, desde donde se envía a los filtros rociadores empacados con medio plástico; ahí, la materia orgánica se transforma en materia celular, bióxido de carbono y agua.

La materia celular se adhiere al medio plástico, de donde se desprende periódicamente por la acción cortante del agua, en su paso a través del filtro rociador. La mezcla se conduce a los tanques de contacto de sólidos, donde se aplica aire por difusión, lo cual ayuda a estabilizar la materia orgánica y permite la floculación del material celular para mejorar la eficiencia de los tanques sedimentadores.

El cultivo biológico que se sedimenta, se recolecta en un canal perimetral y se conduce al tanque de contacto de cloro para su desinfección, previo a su disposición fina. De este modo, el agua tratada resultante es clara, brillante sin olor y bacteriológicamente inocua, lo cual permite cumplir con las condiciones particulares de descarga establecidas por las autoridades.

Los sólidos que se retienen en las rejillas se manejan como basura; las arenas se transportan a un relleno sanitario y el exceso de lodos biológicos, previo espesamiento, se someten a estabilización por digestión aerobia para eliminar bacterias patógenas y evitar molestias sanitarias. Estos lodos se secan en filtros de banda y se disponen en terrenos aledaños como acondicionadores de suelos.

2.2 Planteamiento del Problema

Ante el problema de la escasez de fuentes de abastecimiento para Agua Potable y el crecimiento desmedido de la población en las zonas Metropolitanas de la Cd. De México y Toluca; que afectan directamente al Estado, es necesario desarrollar una tecnología con procesos sencillos, que no requieran de mano de obra especializada para su operación; pero que a su vez sean eficientes en remover los contaminantes del efluente de una PTARM.

El agua es un bien finito, en teoría se dispone de la misma cantidad, se puede considerar como pequeñas pérdidas, el volumen de gotas que han logrado escapar de la gravedad terrestre.

Aunque es el planeta azul, la cantidad de agua salada en el océano es del 97.5%, el 2.24% de agua dulce en los casquetes polares (Antártida y Groenlandia) y en las aguas subterráneas muy profundas es el 0.26 de agua dulce disponible para las actividades humanas, Industriales, agropecuarias y municipales. Esta cantidad equivale a una gota de agua sobre una naranja.

El agua contenida en lagos, embalses, y ríos, es pequeña; a ello se debe agregar, que varios cuerpos de agua superficial se encuentran contaminados. En México son conocidas las grandes cuencas en que el cuerpo receptor está altamente contaminado, luego el % disponible ha disminuido por actividades antropogénicas.

El agua en México

En el país se dispone de 5,000 m³/habitante año, en promedio; que es un poco superior para generar estrés por agua. Debido a la topografía se tiene una gran planicie, entre la Sierra Madre Occidental y la Oriental. Desde el límite sur, como parte de los estados de México, Querétaro, Hidalgo, Tlaxcala, hasta los Estados fronterizos están ubicados en la gran meseta con bajas precipitaciones.

Según las zonas consideradas por la Comisión Nacional del Agua (C.N.A), la disponibilidad se especifica en la tabla 4.

Tabla 4.- Disponibilidad del volumen de agua de las zonas consideradas por la C.N.A

| ZONA | VOLUMEN m ³ /hab. año |
|----------------------|----------------------------------|
| Baja California | 1700 |
| Noreste | 3400 |
| Río Bravo | 1300 26% de la media nacional. |
| Cuencas del Norte | 1100 22% de la media nacional |
| Pacífico Norte | 6100 |
| Golfo Norte | 5100 |
| Valle de México | 227 4.5% de la media nacional |
| Golfo Sur | 24600 |
| Lerma Pacífico | 1200 24% de la media nacional |
| Balsas | 4600 |
| Pacífico Sur | 14200 |
| Golfo Centro | 13900 |
| Península de Yucatán | 10800 |

La tabla 5, se refiere al estado de México y zona Metropolitana donde se originan las cuencas del Balsas, Lerma y Panuco.

Tabla 5.- Disponibilidad de volumen en las cuencas del Balsas, Lerma y Panuco.

| | |
|------------------------|--|
| Valle de México Panuco | 227 m ³ /hab año. 4.5% del total nacional |
| Lerma | 200 m ³ /hab año. 4.0% del total nacional |
| Balsas | 4600 m ³ /hab año. 92.0% del total nacional |

CAPÍTULO 3
JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS OBJETIVOS Y
NORMATIVIDAD

3.1 Justificación

Con el fin de hacer frente a la disminución de la disponibilidad del agua, será necesario realizar acciones para reducir su demanda tales como: incrementar el tratamiento de agua residual con tratamientos terciarios avanzados para obtener la calidad de agua para su reutilización.

Para ello el efluente tiene como alternativa que en el tratamiento físico-químico, se lleve con eficiencia la coagulación-floculación para cumplir con la norma NOM-127-SSA1-1994. Actualmente la sociedad no acepta la reutilización del agua, por lo que es necesario dar a conocer el agua que se obtiene y los beneficios, para que se apliquen políticas del re-uso y se inicie una educación en las escuelas al respecto.

3.2 Hipótesis

Es factible reutilizar el efluente de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Municipal Toluca Norte residual, con el tratamiento físico-químico que se realice en la planta semipiloto potabilizadora cumpliendo con los límites máximos permisibles de los principales parámetros de la NOM-127-SSA1-1994.

3.3 Objetivo General

Tratamiento físico-químico en el tren de tratamiento de la planta semipiloto del proyecto de investigación UAEM 1966/2004-2, para reutilizar el efluente de la Planta Toluca Norte, cumpliendo con los límites máximos permisibles de los principales parámetros de la NOM-127-SSA1-1994.

3.3.1 Objetivos particulares

- a) Determinar y analizar los parámetros físicos-químicos biológicos al agua cruda y tratada de acuerdo a la normatividad vigente.
- b) Realizar pruebas de jarras obteniendo la óptima concentración de los reactivos para la coagulación-floculación logrando claridad y buen tamaño de floc para la sedimentación.
- c) Filtrar con arena silica, el efluente municipal de la planta obteniendo mayor rendimiento, que tarde mas en saturarse y que los retrolavados no se realicen seguidos por la saturación de la arena, es decir que pueda estar en operación por tiempos mas prolongados.
- d) Evaluar columna de adsorción y aumentar el tiempo de operación, evitando que se sature la columna en poco tiempo.

- e) Determinar la eficiencia entre los diferentes procesos de tratamiento (sedimentador, filtro de arena, columna de carbón activado, ozonador, rayos U.V. y clorador).

3.4 NORMATIVIDAD

3.4.1 Normatividad (NOM-127-SSA1-1994).

El 3 de febrero de 1995, fue publicada la aprobación de la NOM-127-SSA1-1994 relacionada con la salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características bacteriológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas.

Las aguas superficiales contenidas en ríos y presas es contaminada por fenómenos naturales y por acciones antrópicas; ambas alteran la calidad del agua, por lo que en un sistema de potabilización de aguas superficiales, se debe considerar las concentraciones permisibles de contaminantes, que afectan la salud del hombre.

El agua es uno de los medios para que los contaminantes lleguen al consumidor, provocando daños físicos y mentales.

Las bacterias y virus son los causantes de enfermedades; algunas ocasiones son transmitidas por el agua de consumo, en otras por ingestión de alimentos contaminados y por un aseo personal deficiente.

Las enfermedades más comunes, cuyo factor es el agua son: poliomielitis, hepatitis, cólera, tifoidea, paratifoidea, ántrax, tuberculosis, desinteria.

Otros contaminantes provocan: intoxicaciones, cáncer, mutaciones.

Bajo situación de emergencia las autoridades competentes podrán establecer los agentes biológicos nocivos a la salud que se deban investigar.

Con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor, se debe someter a tratamientos de potabilización (NOM-127-SSA1.1994).

3.4.2 Tratamientos para la potabilización del agua por coagulación-floculación de acuerdo a la NOM 127-SSA1-1994.

Existen diferentes alternativas para tratar los contaminantes presentes en el agua, los que se tratan por medio de la coagulación- floculación son:

- a) Características físicas y organolépticas: Color, olor, sabor y turbiedad.
- b) Constituyentes químicos: Arsénico.
- c) Materia orgánica
- d) Mercurio. Después de la coagulación-floculación se realiza la precipitación-filtración, esto es cuando la fuente de abastecimiento contenga hasta 10mg/L, cuando es mayor se remueve con carbón activado en polvo.
- e) Nitratos y nitritos, puede ser combinado coagulación-floculación-sedimentación-filtración.
- f) Nitrógeno amoniacal.- También puede ser removido por arrastre con aire, intercambio iónico ó cloración.
- g) Sólidos disueltos totales.- Coagulación-floculación-sedimentación-filtración (NOM-127-SSA1.1994).

Remoción química y física del amoníaco

El amoníaco puede ser removido por arrastre con aire, intercambio iónico o cloración. **En la separación con aire**, se añade al agua al agua sosa cáustica (NaOH) ó cal, para incrementar el pH hasta 10.5-11. Esto libera el gas amoníaco, el cual es separado por el aire que entra en contacto con el agua. Se recomienda utilizar una columna de separación para remover el amoníaco, recuperándolo como sulfato de amonio, y reaccionando con H_2SO_4 antes de ser liberado a la atmósfera. La eficiencia de un separador por aire, es cercana a 90-95%, y los costos aproximadamente 30% mayores que en la remoción biológica de nitrógeno (Rodríguez, L.J., 1990).

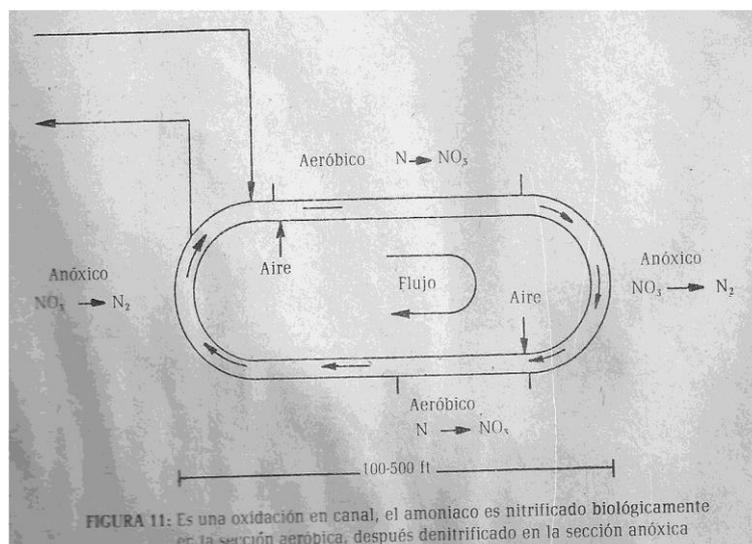


Figura 12. Es una oxidación en canal, el amoníaco es nitrificado biológicamente es la sección aeróbica, después desnitrificado en la sección anóxica.

Por intercambio iónico, usando la zeolita natural (clinoptilolita) que selecciona el NH_3 sobre los iones Ca, Mg y Na, aunque estos minerales reducen la capacidad del NH_3 . La zeolita, es generada con sodio o hidróxido de calcio a pH elevado; entonces puede separarse el amoníaco del agua por medio de aire, y recuperar el regenerante. Tiene una eficiencia del 90-97%, y un costo cerca del 55% más que la remoción biológica del nitrógeno.

El cloro oxida el amoníaco a nitrógeno gas, pero también produce mono y dicloroaminas. El punto límite para el cual la concentración de cloroaminas es mínima, es para una relación cloro: amonio de 8-10 (7.6 en teoría). Para minimizar la formación de nitrato y triclorados, el pH se mantendrá cercano a 7. En una operación eficiente, la cloración tiene un 90-100% de eficiencia. (Rodríguez, L.J., 1990).

3.4.3 Límites Máximos Permisibles.

El agua residual tratada reutilizada en servicios al público no deberá contener concentraciones de metales pesados y cianuros mayores a los límites máximos permisibles establecidos en la columna que corresponde a embalses naturales y artificiales con uso en riego agrícola de la tabla 3 de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, referida en el punto 2 de la norma NOM-003-ECOL-1997.

Tabla 6.- Límites máximos permisibles de contaminantes
(NOM-003-ECOL, tabla 1.1997).

| Tipo de Reuso | Promedio Mensual | | | | |
|--|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------|
| | Coliformes Fecales NMP/100ml | Huevos de Helminto (h/l) | Grasas y aceites mg/l | DBO ₅ mg/l | SST mg/l |
| Servicios al Público con contacto directo | 240 | ≤1 | 15 | 20 | 20 |
| Serv. Al Público con contacto indirecto u ocasional. | 1000 | ≤1 | 15 | 30 | 30 |

Tabla 7.- Límites máximos permisibles de contaminantes
(NOM-001-ECOL, tabla 3.1997).

| Parametros (*) mg/l excepto cuando se especifique | Embalses naturales y artificiales | | | |
|---|-----------------------------------|-------|---------------------------|-------|
| | Uso en riego agrícola (B) | | Uso Público urbano (C) | |
| | PM | PD | PM | PD |
| Arsénico | 0.2 | 0.4 | 0.1 | 0.2 |
| Cadmio | 0.2 | 0.4 | 0.1 | 0.2 |
| Cianuro | 2 | 3 | 1 | 2 |
| Cobre | 4 | 6 | 4 | 6 |
| Cromo | 1.0 | 1.5 | 0.5 | 1.0 |
| Mercurio | 0.010 | 0.020 | 0.005 | 0.0-1 |
| Niquel | 2 | 4 | 2 | 4 |
| Plomo | 0.5 | 1.0 | 0.2 | 0.4 |
| Zinc | 10 | 20 | 10 | 20 |

(*) Medios de manera total.

(B), (C): Tipo de cuerpo receptor según la ley federal de derechos.

P.D.= Promedio diario.

P.M.= Promedio mensual.

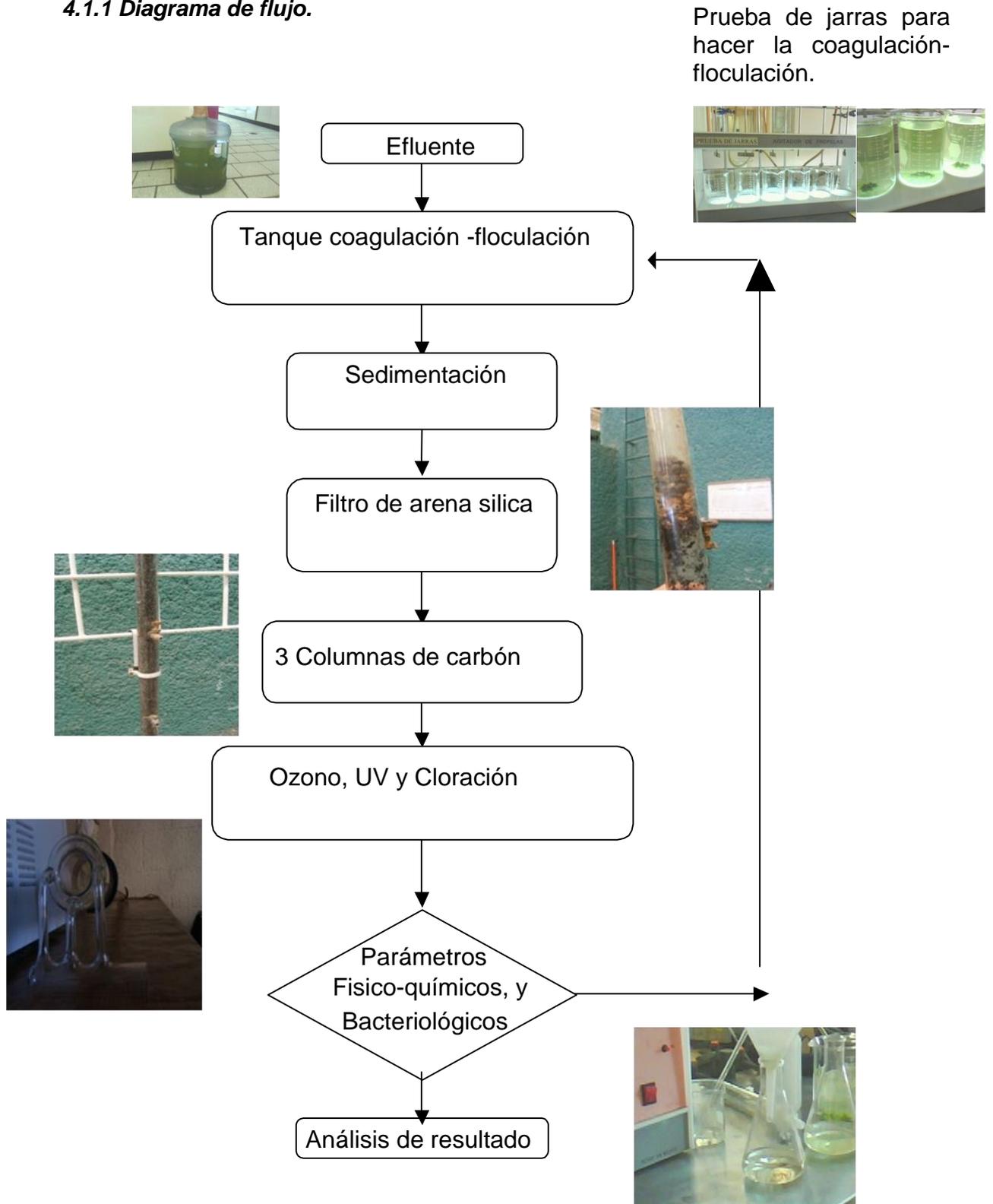
CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO Y METODOLOGÍA

4.1 Descripción del modelo

4.1.1 Diagrama de flujo.



4.1.2 Descripción del modelo semipiloto de laboratorio.

El modelo consiste de:

- a) Tanque coagulación – floculación – alimentación.
- b) Sedimentación con accesorio de alta tasa de remoción.
- c) Filtro rápido de arena silica.
- d) Tres filtros de carbón activo.

a) Tanque coagulación-floculación-alimentación, se tomaran 140 litros de muestra, en el efluente de la planta norte Toluca, de este volumen se tomaran 5.0 litros; para análisis y determinación de las concentraciones de los parámetros anotados en la norma NOM-003-ECOL-1997, que será el influente de “aguas crudas” al sistema de potabilización.

a.1) Prueba de jarras:

De la muestra, se separan 6 litros para la prueba de jarras. (se hará anteriormente la selección de reactivo floculante, que proporcione mejor formación de flocs). A la primera jarra se le adiciona 5 mg/l del reactivo a la segunda 10mg/l y a las cuatro siguientes 15mg/l, 20mg/l, 25mg/l, y 30mg/l a la sexta.

Se tomara un tiempo de 20 min. de movimiento de aspas, con 30 r.p.m., fue proporcionado un gradiente de velocidad de $30-40s^{-1}$.

Se selecciona la concentración óptima; posteriormente se iguala en las 5 jarras restantes, y se repite el proceso de floculación, con el mismo tiempo 20 minutos.

Pasando este tiempo se deja sedimentar por tiempo de 1 hora.

Pasando este tiempo se extrae el sobrenadante teniendo cuidado de no arrastrar la materia sedimentada. A este volumen se le determina los mismos parámetros.

Para determinar el valor “Concentraciones después de la prueba de jarras”.

a.2) Al depósito de 200 litros de capacidad, se colocan el resto de la muestra cruda, 130 litros; y la adición de reactivo de concentración optima; agitando lentamente con una paleta, por un tiempo de 10-15 minutos, en el cual se debe tener la formación de flóculos, semejante, a la obtenida, en la prueba de jarras. En el croquis se muestra los puntos de extracción de lodos y la alimentación a la planta semipiloto.

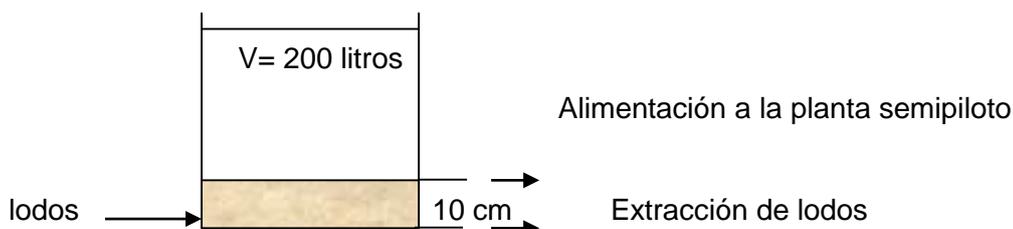


Figura 13. Croquis del tanque floculador –alimentador sistema.

b) Sedimentador con manto de lodos y accesorio de alta tasa de remoción.

Consiste de un tubo con diámetro interior de 4.45 cm = 0.0445 metros. Se considera realizar corridas experimentales variando las cargas hidráulicas superior de 90 m³/m² día, 100 m³/m² día y 120 m³/m² día.

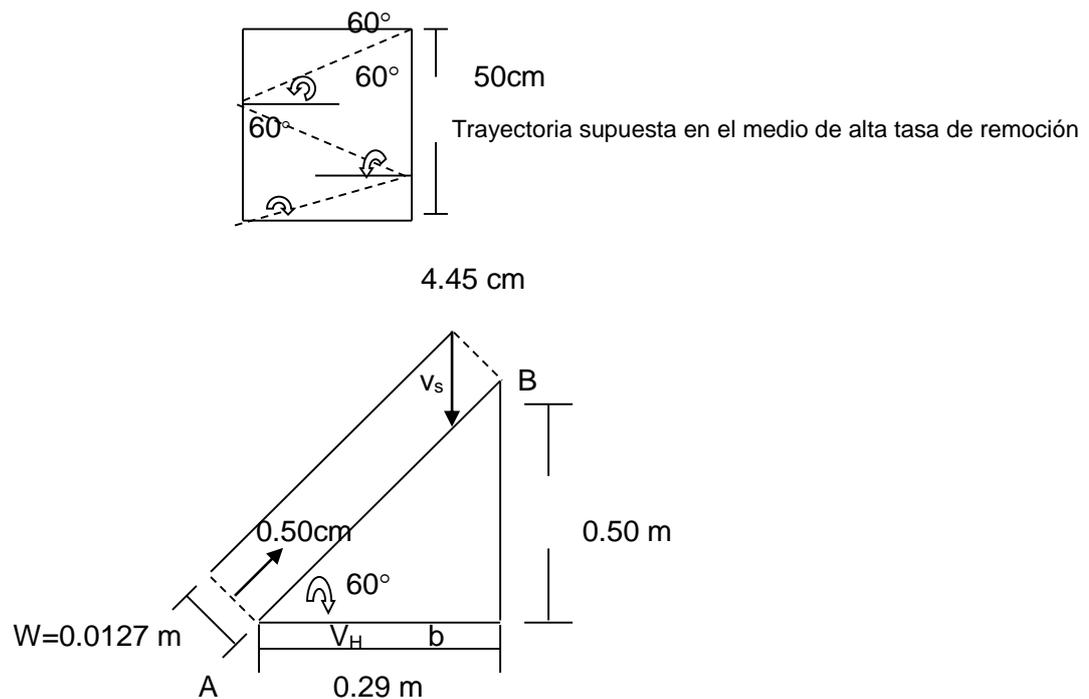
Con estos valores se tienen las velocidades ascendentes consignadas.

Tabla 8. Carga Hidráulica superficial m³/m² día del sedimentador.

| Área m ² | Velocidad m/s | Caudal m ³ /s | Caudal l/s | Caudal ml/s |
|---------------------|---------------|--------------------------|------------------------|-------------|
| 90 | 0.00104 | 1.617x10 ⁻⁶ | 1.617x10 ⁻³ | 1.617 |
| 100 | 0.00116 | 1.81x10 ⁻⁶ | 1.81x10 ⁻³ | 1.81 |
| 120 | 0.00139 | 2.17x10 ⁻⁶ | 2.17x10 ⁻³ | 2.17 |

Remoción de partículas en el accesorio de alta tasa de remoción.

El medio consiste de cilindros de plástico de ½" (1.27 cm = 0.0127m) y tres centímetros de largo. En el trabajo de investigación "corridas experimentales en un sedimentador con manto de lodos, flujo ascendente: "determinación de la eficiencia" "clave: UAEM 1966/2004-2, se determinó que la eficiencia es la misma que se obtiene utilizando el modelo comercial con geometría trapezoidal, en los ductos, que conforman el modulo bajo este supuesto se calcula de manera semejante.



C) Filtros rápidos de Arena Sílica

Cálculo filtro de arena sílica. (Acrílico)

El filtro rápido de arena sílica tiene las dimensiones siguientes:

| | |
|---|--------------------------|
| Diámetro interno | 4.45 cm = 0.0445 m. |
| Área | 0.00156 m ² . |
| Lecho filtrante | 1.15m. de espesor. |
| Gravas de soporte de diferentes diámetros | 0.26m |
| Falso fondo, lamina de acrílico perforada | 0.05cm. |
| Porosidad | 50% |

Como en el caso anterior se consideran corridas con cargas hidráulicas de 90m³/m² día, 100 m³/m² día y 120m³/m² día.

Tabla 9. Carga Hidráulica superficial m³/m² día.

| Carga Hidráulica | Velocidad descendente m/s | Caudal l/s | Caudal ml/s |
|------------------|---------------------------|------------------------|-------------|
| 90 | 0.00208 | 1.617x10 ⁻³ | 1.617 |
| 100 | 0.00252 | 1.81x10 ⁻³ | 1.81 |
| 120 | 0.00278 | 2.17x10 ⁻³ | 2.17 |

En la columna se han considerado válvulas de ¼", a cada 30cm de distancia vertical; (ver el plano, en el anexo) para tomar muestras y determinar la variación de la concentración de los parámetros que se encuentran en la tabla 6 y 7.

Como accesorio adicional, se ha instalado en la zona del bajo fondo, una tubería, controlada por una válvula de ½" para retrolavado. Se tiene una tubería de ½" conectada a la red hidráulica del laboratorio de modelos hidráulicos, del CIRA. Con la válvula se controla el caudal que provoque una expansión del medio filtrante de 15%.

El número de muestras, como mínimo serán 15, o las necesarias, para que los parámetros estadísticos tengan un grado de confiabilidad del 95%. Los valores de concentración se encuentran en la tabla 10.

D) Tres filtros de Carbón Activado

En el modelo semipiloto se han considerado tres columnas de carbón activo, con flujo descendente con las características físicas e hidráulicas que se muestran en el cuadro.

Condiciones de operación:

| | |
|---------------------------------------|------------------------|
| Diámetro | 4.45 cm 0.0445 |
| Espesor del lecho del Carbón Activado | 1.50 m |
| Volumen del medio filtrante | 0.00234 m ³ |

Tabla 10. Carga Hidráulica superficial m³/m² día para las columnas del carbón activado.

| Área m ² | 90 | 100 | 120 |
|--|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Caudal m ³ /s | 1.617x10 ⁻⁶ | 1.81 x10 ⁻⁶ | 2.17x10 ⁻⁶ |
| Caudal l/s | 1.617x10 ⁻³ | 1.81x10 ⁻³ | 2.17x10 ⁻³ |
| Caudal ml/s | 1.617 | 1.81 | 2.17 |
| Tiempo de detención hrs. | 0.40 | 0.359 | 0.300 |
| Tiempo de detención min. | 24 | 21.54 | 18.36 |
| Tiempo de contacto Total de las 3 columnas (minutos) | 72 | 64.62 | 55.08 |

4.1.3 Procesos adicionales (Oxidación química y desinfección).

a) Preoxidación en el tanque floculador-alimentación.

En el tanque floculador se realizará una preoxidación con peróxido de hidrógeno, en la prueba de jarras, se adicionarán 5 mg/l a la primera, para las cinco posteriores en orden se adicionarán 10mg/l, 15mg/l, 20mg/l, 25 mg/l y 30mg/l para la sexta jarra.

b) Proceso de oxidación ozono-peróxido

La oxidación y desinfección con ozono-peróxido se ubicará después de la última columna.

c) Desinfección por UV.

La desinfección y oxidación por UV y cloro se ubicarán al final del sistema. Las dosis y tiempos de contacto óptimos; se determinarán durante las corridas experimentales.

d) Cloro.

En caso de que el análisis muestre la presencia de materia orgánica o de microorganismos, se considerará el proceso de electrocoagulación en el punto crítico.

4.2 Metodología

4.2.1 Caracterización del agua residual cruda y tratada.

Se realiza en los laboratorios de Química Ambiental de la facultad de Química.

4.2.2 Pruebas de tratabilidad en una planta semipiloto de laboratorio.

a) Se realizarán las pruebas de jarras, para determinar la concentración óptima de reactivos, una vez determinada la concentración óptima, se clasifica a los garrafones por concentración determinada previamente. Se agitan levemente hasta que se generen los flóculos de buen tamaño. Se dejan asentar para alimentar la planta semipiloto.



Figura 14. Equipo PB-700™ PHIPPS&BIRD™ de pruebas de jarras.

b) El agua a tratar, se trae de la planta Norte Toluca con volumen de 140 – 280 litros por semana.

Que consiste de: a) Filtro lento de arena Silica; b) Tres filtros de carbón activo.

Cada columna tiene válvulas ubicadas a cada 30cm de distancia entre ellas para tomar muestras con diferentes profundidades, así determinar la variación que se tiene en los parámetros seleccionados para evaluar al sistema, de acuerdo a la NOM-003-ECOL-1997, agua para re-uso cumpliendo con los límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua estos son: 1.- Turbiedad 2.- color 3.- SST 4.- SDT 5.- DQO 6.- Dureza total 7.- Fluoruros 8.- Nitratos 9.- Nitritos 10.- Nitrógeno amoniacal 11.- pH 12.- Sustancias activas al O₃ al de metileno (SAAM) 13.- DBO Total 14.- DBO soluble 15.- Coliformes totales 16.- Coliformes fecales.

Posteriormente se instalarán los procesos siguientes:

a) Pre oxidación b) Ozonación c) Rayos UV y d) cloración.

Para cada proceso que se añada, se analizarán los parámetros anotados para determinar la eficiencia de cada elemento del sistema.

Se considerarán como mínimo 15 muestreos para cada alternativa, tal que permita el manejo estadístico de los valores obtenidos.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

En este capítulo se presenta el artículo del capítulo del libro “Tópicos Selectos en ciencias Ambientales” enviado a la Secretaría de Estudios Avanzados de la Universidad del Estado de México, como producto de la Investigación.

PROCESOS FÍSICO-QUÍMICOS AVANZADOS APLICADOS EN EL EFLUENTE DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES (PTARM PLANTA NORTE TOLUCA) CONSIDERANDO LAS CONCENTRACIONES DE LA NOM-127-SSA1-1994.

Autores:

Rosalía María José Velázquez Jiménez.

Carlos Solís Morelos.

Arturo Colín Cruz.

1. Resumen

Para el buen desarrollo de las principales actividades humanas, es necesario disponer de 4,000 m³ / persona-año. En la república Mexicana, únicamente en las regiones hidrológicas V, X, XI y XII disponen más de 13,097 m³ / persona-año, ubicadas en el Sur y Sureste. Las regiones restantes, que cubren la mayor parte del territorio nacional y en donde se ubican los mayores asentamientos y actividades industriales, disponen de 1,734 m³ / persona-año. En la ciudad de México y zona metropolitana disponen de 143 m³ / persona-año (Atlas del Agua en México, CNA). De los 653 acuíferos del país, actualmente 104 de ellos están sobreexplotados; se espera que con el aumento poblacional el número se incremente.

Las dependencias del manejo, control del agua y la ley de Aguas Nacionales, recomiendan la reutilización para usos industriales, municipales y producción de energía. La investigación se lleva a cabo en un modelo semipiloto con flujo continuo, con el objetivo del tratamiento físico-químico en el tren de tratamiento de la planta semipiloto del proyecto de investigación UAEM 1966/2004-2, con procesos avanzados para la potabilización y reutilización del efluente de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Municipal (PTARM) Planta Toluca Norte, cumpliendo con los límites máximos permisibles de los principales parámetros de la NOM-127-SSA1-1994 (agua para consumo humano) y la NOM-014-CNA-2003 (agua para recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada).

2 Antecedentes.

La reutilización del agua tratada de los efluentes de PTARM, es aplicada en la generación de energía eléctrica, riego de áreas verdes públicas, campos de golf, industria, lagos en centros de diversión.

Para reúso en servicios municipales, se tienen casos interesantes como los siguientes:

- a) Caso Windhoek, Sudáfrica. La PTARM de Windhoek trata un caudal de $4,500\text{m}^3/\text{día}$ (52.0 lps) (D'Istri) en una tercera parte de la requerida por la población. El volumen es utilizado y retratado de manera continua. Posteriormente y considerando el éxito en Windhoek en Pretoria, el departamento Municipal de Alcantarillado, construyó un sistema de potabilización para tratar 43 lps, para incrementar la demanda municipal y el desarrollo industrial.
- b) Ciudad de Denver Colorado. En 1990 generó un Plan Maestro que tiene como propósito el reúso de Agua Residual Municipal (ARM) tratadas como fuente de suministro de agua potable. El plan a largo plazo es tratar $1.2\text{ m}^3/\text{s}$ para uso industrial, y $4.3\text{ m}^3/\text{s}$ para uso municipal, en el año 2000 planeó proveer el 25% del caudal requerido para cubrir las demandas de la ciudad (Linsted et.al.). En ese lapso, el Denver Board of Water Commissioners desarrolló un programa para promover la aceptación del público.

El problema actual es que no se dispone de normas aplicadas al reúso en servicios municipales, la NOM-127-SSA1-1994 permite las concentraciones máximas que debe contener las aguas para consumo humano.

La Norma Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2007 "Requisitos para la Recarga Artificial de Acuíferos con Agua Residual Tratada", considera lo que se debe cumplir con la NOM-127-SSA1-1994-CNA-1996, la NOM-003-CNA-1996 que considera los requisitos durante la construcción de pozos de extracción de

agua para prevenir la contaminación de acuíferos y la NOM-004-CNA-1996 que fija los requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento, rehabilitación y cierre de pozos de agua en general. Agosto de 1997 (Ref. NOM-127-SSA1-1994, NOM-014-CONAGUA-2007, NOM-003-CNA-1996 y NOM-004-CNA-1996).

Al carecer de una normatividad para el reúso en zonas municipales, esta investigación considera los parámetros de la NOM-127-SSA1-1994 que es más estricta.

3 Antecedentes del trabajo de investigación.

En el año de 2004 se terminó el trabajo de investigación UAEM-1966/2004-2, que consistió en tratar un caudal de agua, ensuciada artificialmente (suelo cerca del laboratorio de modelos hidráulicos del CIRA-Facultad de Ingeniería de la UAEM) a la cual se adicionó un volumen de aguas residuales municipales.

El modelo consistió de las partes y procesos siguientes:

Tanque de 10 m³ para preparar agua ensuciada artificialmente -floculador de flujo helicoidal-sedimentadores: Uno con manto de lodos y con accesorio de alta tasa de remoción, módulo comercial con flujo cruzado y conductos trapezoidales, otro módulo, con manto de lodos y como accesorios de alta remoción, tramos con tubo de PVC de 1" de diámetro y longitud de 4 cm. - Dos módulos de filtros de arena sílica 1mm de diámetro y 70 cm de espesor. Otra línea con dos medios de arena sílica inferior y una capa de grava porosa (tepojal semejante a la piedra pómez); - Columna de carbón activo; - Rayos UV y cloración. Se presenta un diagrama de flujo de este modelo en la figura 1.

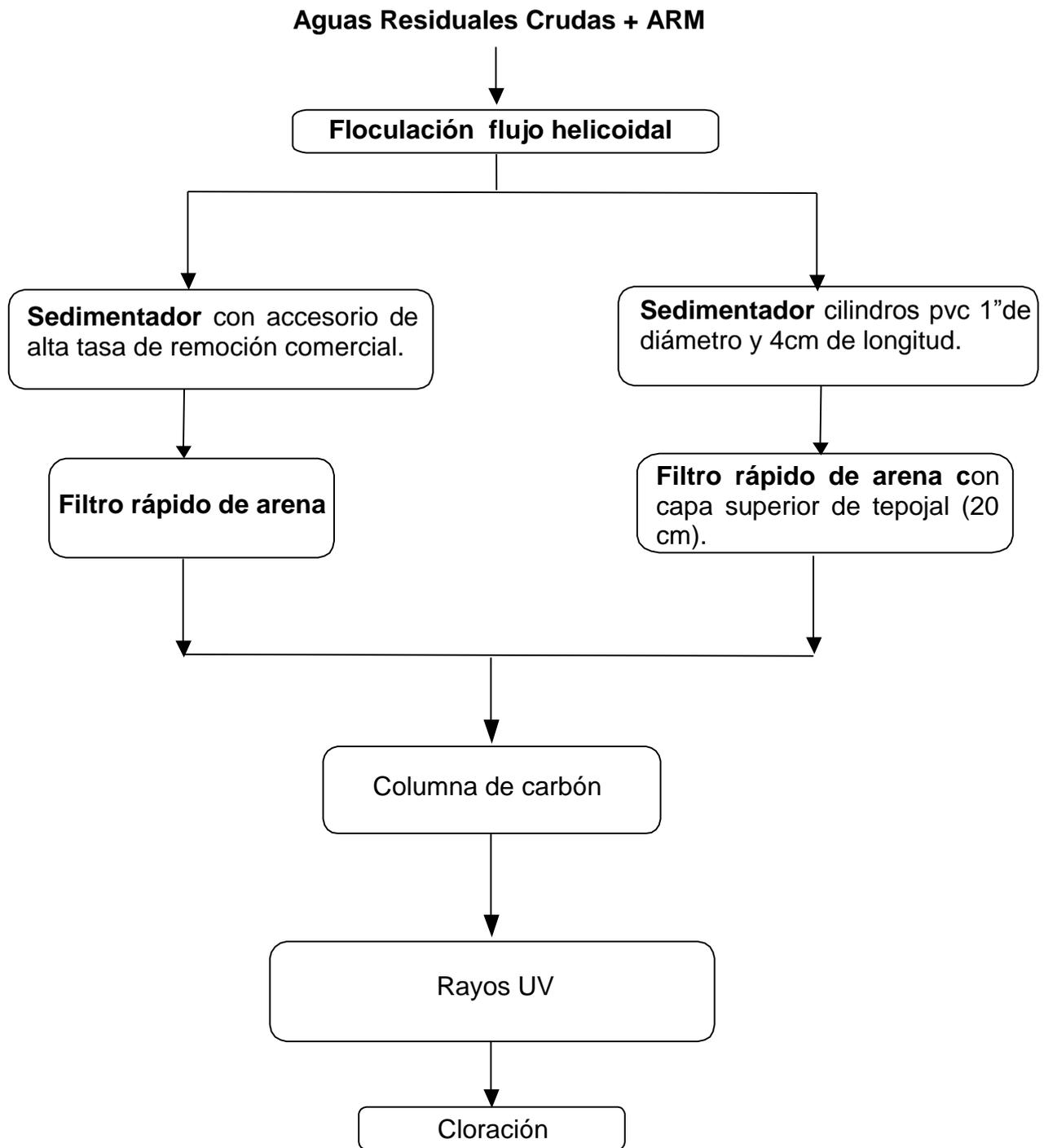


Figura 1. Diagrama de procesos del modelo 1ª Etapa.
Caudal a tratar 0.4 lps. (34.6 m³/día).

Resultados.- Por limitaciones económicas, únicamente se consideraron los parámetros de la tabla 1.

Tabla 1. Valores de los parámetros en el sistema.

| Parámetro | Influyente | Efluente | η (%) |
|-----------------------------|------------|----------|------------|
| SST (mg/L) | 720 | 7.0 | 98.7 |
| SSV (mg/L) | 106 | 1.4 | 97.9 |
| Color (Pt Co) | 2642 | 8.0 | 99.2 |
| Turbiedad (UNT) | 488 | 7.0 | 99.2 |
| DQO (mg/L) | 106 | 0.0 | 100.0 |
| Coliformes totales (/100ml) | 184,250 | 0.0 | 100.0 |
| Coliformes fecales (/100ml) | 12,960 | 0.0 | 100.0 |

(Informe Técnico Final. Procesos físico-químicos avanzados, clarificación de aguas superficiales crudas. C. Solís).

Estos resultados alentaron a seguir con otra etapa, considerando procesos avanzados adicionales y normas más estrictas.

4 Hipótesis.

Es posible cumplir con las concentraciones máximas permisibles de la NOM-127-SSA1-1994, considerando procesos físico-químicos avanzados aplicados al efluente de una PTARM de la Planta Toluca Norte.

5 Objetivo General

Tratamiento físico-químico en el tren de tratamiento de la planta semipiloto del proyecto de investigación UAEM 1966/2004-2, para reutilizar el efluente de la Planta Toluca Norte, cumpliendo con los límites máximos permisibles de los principales parámetros de la NOM-127-SSA1-1994 y de la NOM-014-CNA-2003.

Objetivos particulares:

- a) Localizar los puntos críticos para los procesos de oxidación, UV, H₂O₂.
- b) Localizar el sitio para aireación con micro burbujas a pH 10.5 a 11 para remoción de NH₃, de acuerdo a la figura 2.
- c) Según la concentración de contaminantes, recomendar que después del tratamiento secundario se considere un sistema de biopelícula, antecedente a los procesos físico-químicos avanzados.

- d) Recomendar los usos del efluente para actividades industriales, recarga de acuíferos (según la NOM-014-CNA-2003) y generación de energía eléctrica, entre otros.

6 Disponibilidad del agua en México.

Esta puede ser definida de dos formas:

- a) Como el volumen m^3 /persona-año, en donde se ha determinado que con un volumen de 4,000 m^3 /persona-año, es el adecuado para desarrollar las principales demandas. Riego, municipales, industria, generación de energía eléctrica y diversión.

Zonas con un volumen mayor a 4,000 m^3 /persona-año, no tienen estrés por el agua y pueden desarrollar las principales actividades anotadas, y, zonas con menor volumen están sujetas a estrés y una de las actividades tendrá que ser limitada, afectando la economía y el desarrollo armónico de la zona o país.

- b) El otro criterio (Organización Meteorológica Mundial, ONU para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 1997). Denominado Índice de Escasez de Agua. Disponibilidad natural media del agua per cápita (Atlas del agua en México CNA, 2009, primera reimpresión 2010). Anota que la disponibilidad natural media es la división del valor nacional entre el número de habitantes; en 1950 se tenía una disponibilidad media de 18,000 m^3 /persona-año, cuando la población era inminentemente rural y para el año 2007 la disponibilidad era de 4,300 m^3 /persona-año. En la tabla 2, se muestra la población urbana y rural en México.

Tabla 2. Población Urbana en México.

| Año | Rural | Urbana | % Pob |
|------|------------|------------|-------|
| 1950 | 10,800,000 | 10,980,000 | 49.6 |
| 2000 | 25,800,000 | 86,967,000 | 23.0 |

(C. Solís M. Tratamiento ARM: Reactor UASB-Laguna-filtro anaerobio. 2002).

En este período que coincide con la industrialización en el país se tiene un incremento de población urbana de 10'980,000 a 86'963,000 habitantes, lo que

provocó los grandes asentamientos humanos. Con el incremento en la demanda de todos los servicios. La población rural disminuyó del 49.6% a 23%, este proceso histórico debe continuar con la tendencia que a corto plazo se tenga 90% población urbana y 10% de rural (INEGI).

La CNA dividió a la República Mexicana en 13 Regiones Hidrológico-Administrativas indicadas en la tabla y la disponibilidad natural media, las cuales se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Regiones Hidrológico-Administrativas de México.

| Región hidrológica administrativa | Población 2007 en millones de habitantes | Disponibilidad media per cápita 2007 m³/hab/año. |
|--|---|--|
| I Península Baja California | 3.581 | 1,289 |
| II Noroeste | 2.57 | 3,192 |
| III Pacífico Norte | 3.96 | 6,471 |
| IV Balsas | 10.54 | 2,055 |
| V Pacífico Sur | 4.12 | 7,960 |
| VI Río Bravo | 10.7 | 1,124 |
| VII Cuencas Centrales del Norte | 4.12 | 1,888 |
| VIII Lerma-Santiago-Pacífico | 20.63 | 1,650 |
| IX Golfo Norte | 4.94 | 5,162 |
| X Golfo Centro | 9.58 | 9,964 |
| XI Frontera Sur | 6.5 | 24,270 |
| XII Península de Yucatán | 3.9 | 7,603 |
| XIII Aguas del Valle de México | 21.09 | 143 |
| TOTAL | 106.231 | 72,771 |
| PROMEDIO | | 4,312 |

(CNA., 2009. "Atlas del Agua en México").

Analizando el cuadro 3, se destaca que en 5 regiones se tiene un porcentaje del 59% en relación al total del país. En donde se tiene los grandes asentamientos, la industria y tierras de cultivo.

El 50% de las regiones tienen una disponibilidad de agua abajo de 4,000 m³/persona-año, con el consiguiente estrés. En las regiones con mayor disponibilidad, son estados con menos población e industria.

Criterio de Índice de escasez de agua (Organización Meteorológica Mundial ONU para la educación, la Ciencia y la Cultura 1997). La presión de que es objeto el

agua, se define como el volumen estimado de agua que usa anualmente un país, como porcentaje de los recursos hídricos disponibles.

La presión se divide en cuatro niveles:

- a) Bajo.- Los países que utilicen menos del 10% de sus recursos hídricos disponibles, no sufren de presiones.
- b) Moderado.- Cuando se estima que se utiliza del 10% al 20% de los recursos disponibles, en general no se tienen presiones.
- c) Mediano-Alto.- El uso del agua disponible está del 20% al 40% y es necesario gestionarla rigurosamente para mantener la sustentabilidad. Se tiene que resolver el problema de competencia entre usuarios diferentes, a fin de que los caudales sean suficientes para mantener los ecosistemas acuáticos.
- d) Elevado.- Utilizar más del 40% de los recursos disponibles, indica una escasez, y la tasa de utilización supera a las aportaciones naturales. Se debe generar fuentes alternativas, se debe prestar una atención especial a la ordenación intensiva del recurso y las demandas. Los mecanismos actuales de uso no son sostenibles y la escasez de agua será un factor limitativo del desarrollo socio-económico y una de las principales actividades será afectada e incidirá en las otras actividades.

7 Marco Teórico.

Los procesos que se consideran en la planta semipiloto de flujo continuo son:

- a) Determinación óptima de los reactivos y polímeros para la formación del floc más denso.
- b) Coagulación-floculación –pre oxidación con H_2O_2 .
- c) Sedimentación.
- d) Aireación con micro burbujas **
- e) Filtración con doble medio filtrante arena sílica lecho inferior, y antracita lecho superior **
- f) Dos columnas de Carbón Activado (se adicionará otra en la 2ª etapa).
- g) Ozonación.
- h) Rayos UV.
- i) Cloración.

** Procesos que se incluirán en la 2ª. Etapa.

Los procesos de coagulación-floculación, sedimentación y filtración son bien conocidos, para ahorrar espacio se omiten y únicamente se describirán los procesos faltantes.

7.1 Aireación con micro burbuja.

La aireación es utilizada como un proceso para la remoción de contaminantes, como flotación de grasas y aceites, para estabilizar la materia orgánica (DBO), para la oxidación de contaminantes. Los requerimientos de oxígeno son principalmente para cubrir las demandas:

- a) Demanda bioquímica de O₂ de la materia carbonosa.
- b) Demanda bioquímica de O₂ de la materia nitrogenosa.
- c) Demanda de O₂ por materia química inorgánica. Se dispone de un método racional mediante un balance basado en el O₂ requerido para la oxidación de la materia orgánica medida como DBO₅. Para un sistema en condiciones de equilibrio se tiene:

Masa de O₂ requerido=demanda de la masa carbonosa- β Evacuados.

B = es el oxígeno equivalente de masa celular calculada como 1.42 masa O₂/masa de la biomasa SSV. Esto no incluye a toda materia orgánica medida como DQO, ya que se tiene una fracción de materia suspendida y en solución que no es biodegradable.

Anotando el balance escrito en forma simbólica se tiene:

$$R_i = Q(S_0 - S) - \beta P_x \quad \text{----- Ec. 1}$$

Para un sistema en condiciones de equilibrio se tiene:

$$R_x = Q Y(S_0 - S) / (1 + b\theta_c) \quad \text{----- Ec. 2}$$

P_x = masa producida en base a S demanda total de O₂.

Sustituyendo se tiene:

$$R_c = Q(S_0 - S) ((1 + b\theta_c - \beta Y) / (1 + b\theta_c)) \quad \text{----- Ec. 3}$$

$R_c = O_2$ requerido por unidad de tiempo para satisfacer la demanda bioquímica de oxígeno de la fase carbonosa M/t.

7.2 El oxígeno transferido bajo condiciones estándar, considerados por los proveedores.

Estos son los siguientes:

- Pruebas a nivel del mar.
- Aplicable al agua municipal (agua de la llave).
- Temperatura a 20°C
- Una concentración inicial de O_2 igual a cero.

Factores que deben considerarse para determinar la transferencia de O_2 para condiciones de campo (Metcalf and Eddy, Aeration Manual of Practice, FD13WEF, 1988), esto es:

- Corrección por transferencia de O_2 en aguas residuales:

$$\alpha = KLa (\text{aguas residuales}) / KLa (\text{agua de la llave}) \text{ ----- Ec. 4}$$

α = depende de las características de las aguas residuales de la geometría del reactor, el nivel de mezclado, los valores están en el rango inferior de 0.4 - 0.8 y para el rango superior de 0.6 – 1.2.

- Corrección por concentración de saturación de O_2 , relación en las aguas residuales y la C_s del agua de la llave.

$$\beta = C_s (\text{aguas residuales}) / C_s (\text{aguas de la llave}) \text{ ----- Ec. 5}$$

Para ARM el valor de β es 0.95

- Corrección por temperatura. Esta se realiza multiplicando en la expresión general por (1.024^{T-20})

- T = temperatura media para el mes más frío en °C.

La interrelación de estos factores se anota en la expresión:

$$N_0 = N ((\beta C_{STH} - C_L) (1.024^{T-20}) \alpha F / C) \text{ ----- Ec. 6}$$

N_0 = Transferencia de O_2 para condiciones de campo en $kg O_2/h$

N = Transferencia de O_2 en agua limpia a 20°C nivel del mar y cero concentración de O_2 en $kg O_2/h$.

β = Factor de corrección por la relación de concentraciones agua residual.

C_{STH} = concentración de saturación d agua limpia en el tanque de aireación a la temperatura T y altitud H (mg/L).

$$C_{TH} = Pd/P_{atm} H$$

P_d = presión en mm de Hg del lugar del sistema.

P_{atm} = presión en mm de Hg a nivel del mar (760 mmHg).

$C_{s,20}$ = concentración de O_2 en agua limpia a 20°C y a nivel del mar en mg/L.

C_L = concentración de O_2 en condiciones de operación en mg/L (WAF Manual of Practice FD-13-1996).

Generalmente la energía suministrada para mantener la materia suspendida, es mayor que la energía requerida para proveer el oxígeno para estabilizar la materia orgánica. La amonía puede ser extraída del agua por columnas de aireación o por micro burbujeo con aire es preferible.

Para ello las recomendaciones de la ASCE (American Society of Civil Engineers, No. 8 1992) recomienda que por inyección de ciclo burbujas es removible la amonía $NH_4 - N$ existe en forma a la forma gaseosa ionizada a pH altos.

Para favorecer la remoción de amonía es necesario elevar el pH de 10.8 a 11.5, rango en el cual se tiene el 99% - 100% de amonía en estado molecular. Incrementando el pH; los iones en solución son convertidos a la forma molecular.



En la figura 2 se muestra el efecto de la T y el pH sobre la conversión de iones amonio a iones gaseosos de amonía.

La figura 2 muestra que a un pH de 10 y una T = 15°C se tiene el 70% y a un pH de 11 el porcentaje es de 90-95%.

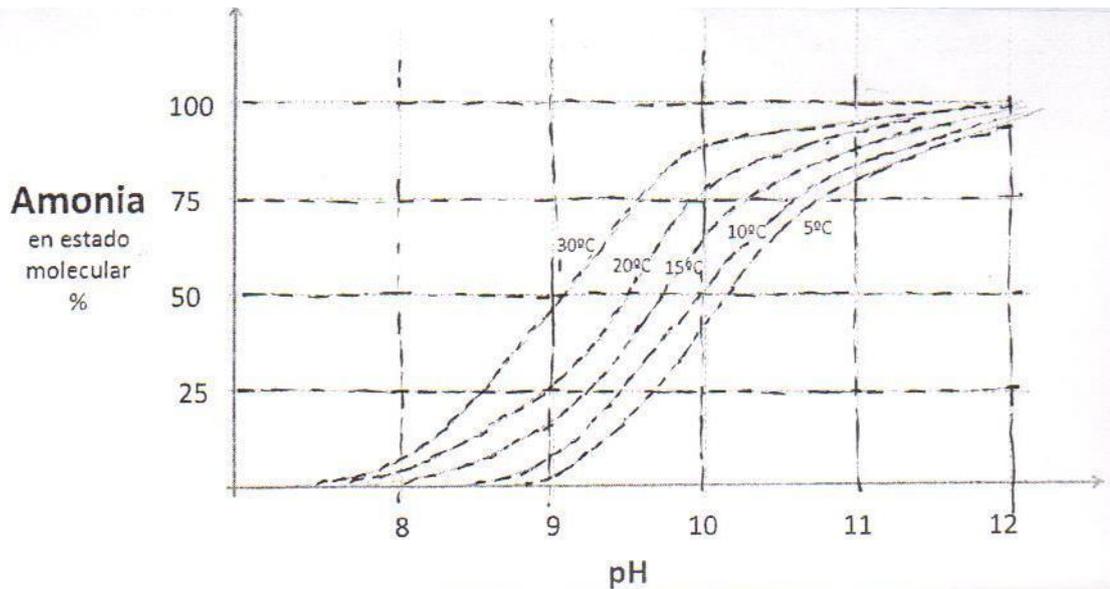


Figura 2. Relación entre el pH y T con el porcentaje de iones amonio gaseosos (Metcalf and Eddy. Wastewater Engineering, Mc Graw Hill, 1991).

8 Procesos de Adsorción en Columnas de Carbón Activado.

Los parámetros de diseño de columnas de adsorción son:

- a) Tiempo de contacto.
- b) Tasa de carbón utilizada.
- c) Requerimiento de pre tratamiento.

El tiempo de contacto indica la cantidad de carbón requerido, obteniendo las dimensiones y el costo. La tasa hasta el agotamiento (que es cuando no se tiene remoción del contaminante) además, la frecuencia a la cual el carbón debe ser reemplazado o reactivado, que incide en los costos de operación del sistema.

El pre tratamiento, es dependiente del pH, sólidos suspendidos, grasas y aceites; estos parámetros proporcionan los procesos requeridos para determinar un sistema óptimo.

Estos parámetros, no se consideran adecuadamente en las pruebas de equilibrio en un sistema batch; como las isotermas de adsorción, por lo que es necesario realizar las pruebas en columnas semipiloto.

En las columnas de adsorción, se requiere seleccionar y monitorear los parámetros para la evaluación, estos son:

Características y tipo del adsorbente

Diámetro de la columna

- Carga hidráulica superficial
- Profundidad del lecho adsorbente
- Peso del adsorbente en la columna
- Contaminantes contenidos en el influente
- Concentración deseada en el efluente.

Es necesario determinar las eficiencias en las columnas; para su aplicación en condiciones de prototipo.

8.1 Tiempo de Contacto

Para un único adsorbato en el sistema con flujo constante, en un tiempo de contacto, no se tiene concentración alguna en el efluente de la columna, esta aparecerá en tiempos mayores al de contacto; como el límite se tiene hasta el agotamiento de adsorción del carbón, no se debe llegar a esta situación, ya que supera en mucho a la concentración deseada en el efluente. En la figura 3, se ilustran las fases de acumulación del contaminante en una columna.

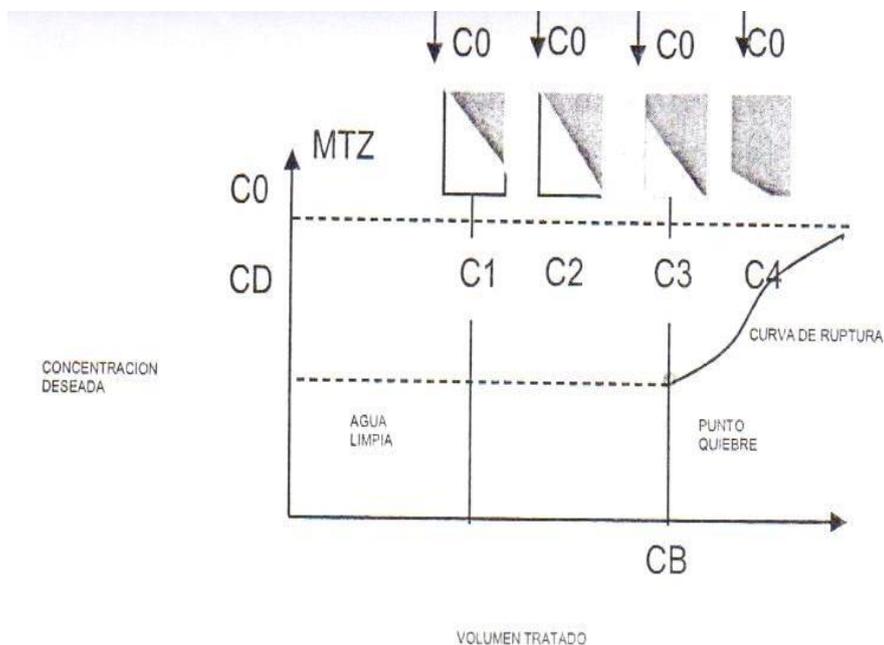


Figura 3. Procesos de adsorción en contaminantes en una columna (Frank L. Slejko).

8.2 Ozonación.

El ozono fue utilizado como desinfectante en Francia y se extendió a los países de Europa. El ozono se utiliza principalmente para el control de olores, sabores y color. Actualmente debido al avance tecnológico en los equipos, ya que el ozono se produce in situ, se utiliza como desinfectante. En procesos avanzados se emplea para remoción de materia orgánica soluble, como desinfectante, ya que desintegra la membrana celular; como virucida tiene más efecto que el cloro.

8.3 Agua Potable.

El ozono, se debe aplicar antes del cloro, se utiliza tanto como oxidante, que como germicida, tiene las mismas propiedades del cloro. El ozono se emplea como:

- a) Bactericida
- b) Virucida
- c) Oxidantes

a y b son Bactericida y virucida.

Sus propiedades como bactericida se deben a su alto potencial como oxidante, actúa en la destrucción de la membrana celular. Este mecanismo es deferente al realizado por el cloro.

Morris, desarrollo el concepto del coeficiente de letalidad, para una bactericida dado. La expresión es:

$$A = 4.6 / ct_{99} \quad \text{----- Ec. 7}$$

A= Coeficiente de letalidad específica.

c= Concentración residual en mg/L

t₉₉= Tiempo en minutos para la destrucción de microorganismos (2 log destrucción).

En la tabla 4 se anotan valores de parámetros en letalidad de bacterias:

Tabla 4. Parámetros de desinfección por ozono similares para el cloro (pH=7; T=10-15°C)

| ORGANISMO | A | C 99/100 |
|-------------------------------|-----|----------|
| Escherichia Coli | 500 | 0.001 |
| Streptococcus fecales | 300 | 0.0015 |
| Polio virus | 50 | 0.01 |
| Endomeaba | 5 | 0.03 |
| Microbacteria tuberculosa | 100 | 0.005 |
| Bacilos megatherium (esporas) | 15 | 0.03 |

A= Coeficiente de letalidad específica= L_{n100} / t_{99}

C_{99/100}= Concentración en mg/L para 99% de destrucción.

Nota:

Dos unidades logarítmicas es $10^{-2} = 0.01$; porcentajes removidos $(1-0.01)*100 = 99\%$ (C. Solís M.). En la tabla 5 se tiene una comparación entre desinfectantes, los virus son los menos resistentes por carecer de una membrana que los proteja, también se establece la inactivación para cada desinfectante y su impacto entre los microorganismos anotados.

Tabla 5. Valores de A a 5°C mg / (l-min).

| AGENTE DESINFECTANTE | BACTERIAS ENTERICAS | CITOS DE AMIBAS | VIRUS | ESPORAS |
|---------------------------|---------------------|-----------------|-------|---------|
| O ₃ | 500 | 0.5 | 1.5 | 2 |
| HOCL como CL ₂ | 20 | 0.005 | 1 | 0.05 |
| OCL como CL ₂ | 0.2 | 0.0005 | 10.02 | 0.005 |

c) Oxidantes:

Ozono como Oxidante

El ozono oxida rápidamente sustancias inorgánicas (sulfitos a sulfatos, hierro ferroso a férrico, manganeso a bióxido de manganeso, nitritos a nitratos).

La oxidación de la materia orgánica, generalmente es pequeña, la reducción de COT está en el rango de 10 a 20%; decrece con la DQO. En cuanto a la remoción

del DBO es considerable con porcentaje de remoción del 50% se tienen casos en que la DQO se incrementa como resultado de la conversión en compuestos biodegradables.

Rayos UV

El California (Clifford-White, 1999), establece los criterios en la desinfección requerida en el tratamiento del efluente; comparando los desinfectantes cloro y UV para la desinfección, cuando el efluente sea reutilizado o su recuperación.

Los criterios son:

- 1.- La turbiedad del efluente de la filtración debe ser menor o igual a dos UNF.
- 2.- La cuenta de coliformes totales, debe ser menor o igual a 22 /100 mL. La eficiencia en la inactivación del virus debe ser equivalente a la obtenida utilizando Cl de 4 log de inactivación (99.99%), para lámparas UV con flujo en paralelo.

8.4 Cloración.

La química del cloro es importante. Los compuestos anotados son relevantes en las reacciones con el cloro y en la desinfección:

Amonia, aminoácidos, proteínas, COT, nitritos, hierro, magnesio, sulfato de hidrógeno, cianidas, N orgánico. Los compuestos anotados demandan gran cantidad de cloro, que limita el poder bactericida del cloro residual.

a) Curva de la demande del cloro.

Este proceso es la implementación del punto de quiebre en la curva, después de la forma lineal se presenta un abatimiento, entre la parte lineal ascendente siguiendo de un tramo descendente, esto es el denominado punto de quiebre. La importancia de éste es la interrelación del control de olor y sabor presentes en el agua, ocasionadas por la adición de cloro. Se encontró que esto ocurre en la región izquierda del punto de quiebre (A) y desaparecen a la derecha de A, como en la figura 4, se anotan las zonas de la cura de dosis de cloro vs cloro residual.

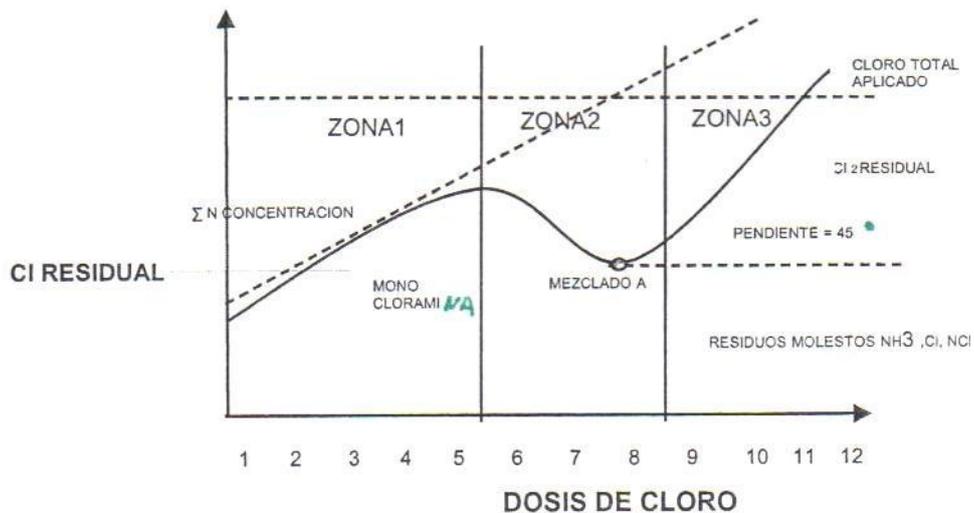


Figura 4. Dosis cloro V_s cloro residual.

El poder de desinfección es también importante siendo 25 veces más a la derecha con respecto a la parte izquierda de A.

El punto de quiebre en la curva es una representación gráfica de las interrelaciones químicas que tienen lugar.

El perfil de la curva, es afectada por: el tiempo de contacto, por concentración de Cl y de amonía N.

b) Desinfección de las tres zonas.

Zona 1. El residual en esta zona, es monocloramina. En esta zona no se forman trihalometanos, no contribuyen al olor y sabor.

Zona 2. Cuando se tiene el punto alto de la curva, la cloramina más la adición de cloro se inician la formación de dicloramina, que tiene doble poder bactericida con respecto a la monocloramina. La dicloramina produce olor y sabor.

Zona 3. En la parte baja de la curva, punto A, se inicia el cloro residual.

Reacciones adicionales en el punto de quiebre.

Se tienen reacciones químicas, además de la oxidación de la amonía a gas nitrógeno. Los productos de las reacciones están relacionadas con el nivel de pre tratamiento; relación inicial de $\text{Cl}_2 / \text{NH}_4$, pH y alcalinidad.

Las reacciones son:

| DESCRIPCIÓN | ESTEQUIOMETRIA DE LA REACCIÓN |
|---|---|
| Punto de quiebre | $\text{NH}_4 + 1.5 \text{HOCL} \rightarrow 0.5 \text{N}_2 + 1.5 \text{H}_2\text{O} + 2.5 \text{H} + 1.5 \text{Cl}$ |
| | $\text{NH}_4 + 3 \text{HOCL} \rightarrow \text{NH}_3 + 3 \text{H}_2\text{O} + \text{H}^+$ |
| Formación de NO_3 y amonía libre | $\text{NH}_4 + 4 \text{HOCL} \rightarrow \text{NO}_3 + \text{H}_2\text{O} - \text{CH} + \text{Cl} + 6 \text{H} + \text{Cl}$ |
| Formación de nitritos | $\text{NO}_3 + \text{HOCL} \rightarrow \text{NO}_3 + \text{H} + \text{Cl}$ |

9. Metodología

Caracterización del efluente PTARM (Planta Toluca Norte). Se tomaron muestras del efluente de la Planta Toluca Norte, la cual consiste de los siguientes procesos:

- 1.- Desarenador .
- 2.- Sistema de biopelículas.
- 3.- Tanques de aereación (lodos activados).
- 4.- Sedimentación secundaria.
- 5.- Cloración.

La muestra refrigerada a 4°C , se envió a un laboratorio certificado, determinándose los valores de concentración de los parámetros contenidos en la NOM-127-SSA1-1994.

Tabla 6. Caracterización de un efluente de la PTARM

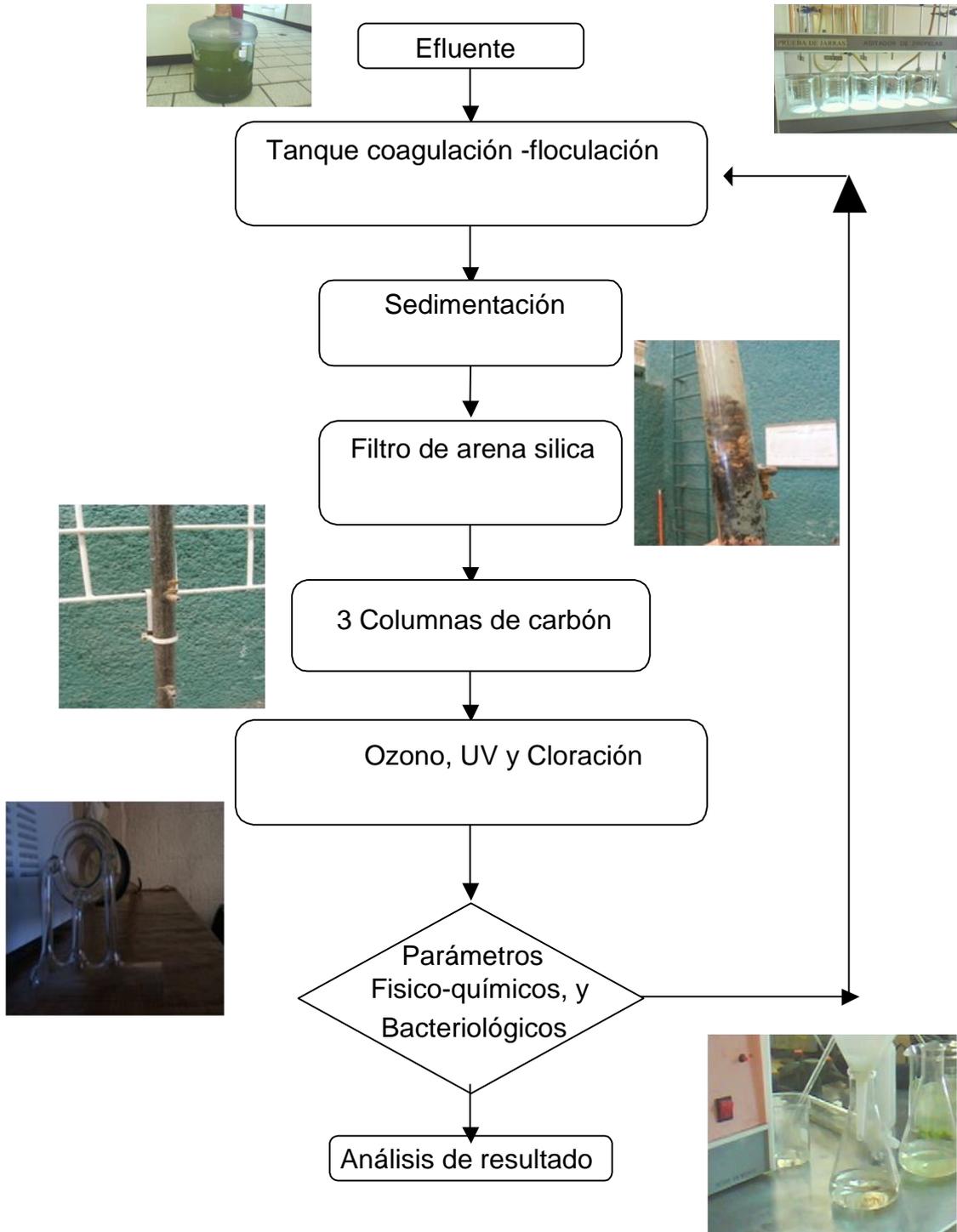
| PARÁMETROS | RESULTADOS | MÁXIMOS PERMISIBLES | UNIDADES | REFERENCIAS |
|--|------------|---------------------|------------------------|-------------------|
| Olor | - | - | | |
| Sabor | - | - | | |
| Color* | <2.5 | 20 | ΔT Co | NOM 201 SSA |
| Turbiedad* | <2.5 | 5 | ΔT N | NOM 201 SSA |
| Físico-Químicas | | | | |
| Aluminio | <0.01 | 0.20 | mg/L | NOM 117 SSA |
| Arsénico | 0.0016 | 0.025 | mg/L | NOM 117 SSA |
| Bario | <0.003 | 0.70 | mg/L | NOM 117 SSA |
| Cadmio | <0.002 | 0.005 | mg/L | NOM 117 SSA |
| Cianuros | <0.02 | 0.07 | mg/L | NOM 201 SSA-02 |
| Cloro libre residual* | .25 | 0.2-1.5 | mg/L | NOM 201 SSA-02 |
| Fluoruros | 3346 | 250 | mg/L | NMX F 532-94 |
| Cobre | <0.1 | 2 | mg/L | NOM 117 SSA-97 |
| Cromo total | <0.006 | 0.05 | mg/L | NOM 117 SSA-97 |
| Dureza total | 199.87 | 500 | mg/L CaCO ₃ | NMX F 517-92 |
| Fenoles | <0.001 | 0.3 | mg/L | NMX AA050 |
| Hierro | <0.10 | 0.3 | mg/L | NOM 201 SSA |
| Cloruros | <0.10 | 1.5 | mg/L | NOM 117 SSA I |
| Manganeso | <0.10 | 0.15 | mg/L | NOM 201 SSA I |
| Mercurio | <0.0005 | 0.001 | mg/L | NOM 117 SSA I |
| Zinc | <0.1 | 5 | mg/L | NOM 117 SSA I |
| N de nitratos* | 6 | 10 | mg/L | NOM 201 SSA I |
| N de nitritos* | 0.08 | 1 | mg/L | NOM 201 SSA I 02 |
| N amoniacal* | 0.31 | 0.5 | mg/L | NOM 117 SSA I-94 |
| pH in situ* | 7.35 | 6.5-8.5 | Unidad de pH | NOM 117 SSA I |
| Plomo | <0.001 | 0.01 | mg/L | NOM 117 SSA I |
| Sodio | 50 | 200 | mg/L | SM 3500 No - A-92 |
| SDT* | 510 | 1000 | mg/L | NMX F5527-92 |
| Sulfatos | 72.8 | 400 | mg/L | NMX F518-92 |
| Detergentes(SAAM) * | <0.1 | 0.5 | mg/L | NOM 201 SSA I 02 |
| Trihalometanos totales | 0.041 | 0.2 | mg/L | SM 6232 D |
| <p>Plaguicidas</p> <p>Los anotados están debajo del valor normado:</p> <p>Hidrocarburos, aromáticos</p> <p>* Coliformes totales 9</p> <p>Δo ND NMP/ 100 ml NOM 112 SSA I</p> <p>* Coliformes totales <3 o ND NMP/100ml NOM 145 SSA I Y * Sulfatos</p> | | | | |

De la tabla número 6, para evaluar el sistema se indicaron los parámetros por medio de un asterisco (*), además se consideraron los siguientes: SST, SSTV, DQO_{total} , DQO_{sol} .

9.1 Descripción del modelo planta semipiloto.

Consiste en el diagrama del flujo, características físicas hidráulicas y una fotografía.

9.1.1 Diagrama de flujo.



Para realizar las corridas experimentales se construyó un modelo piloto con flujo continuo, como se indica en el diagrama de flujo y consiste en:

- A.- Coagulación-Floculación (pre oxidación con H_2O_2).
- B.- Sedimentador con accesorios de alta tasa de remoción.
- C.- Filtro rápido de arena.
- D.- Dos columnas C.A.
- F.- Aireación con micro burbujas.
- G.- Rayos UV
- H.- Cloración.

A.- Coagulación-floculación.

En la prueba de jarras se utilizaron como reactivos: clorhidróxido de aluminio, PAC, sulfato de aluminio (1ª etapa) en la segunda etapa se probaran nuevos reactivos y polímeros.

En este proceso se tiene una pre oxidación con H_2O_2 , debiendo colocarse antes del reactivo, y se vió que cuando se adicionó después, actuó de forma flotante.

Una vez obtenida la concentración óptima de reactivo, se colocaron 200 litros del efluente de la PTAR, en un recipiente de 250 litros, en el cual se adicionó la cantidad de reactivo, agitando levemente hasta formar un floc adecuado.

El dispositivo tiene en el fondo una válvula para retirar los lodos que sedimentan, 5cm. Arriba del fondo se instaló la tubería de alimentación hacia los procesos siguientes.

B.- Sedimentación.

Consiste en un tubo de acrílico, de 6 cm de diámetro y 1.7m de altura. En la parte inferior se tienen el manto de lodos con una altura de 50cm; Se controla mediante una válvula, en la cual se extrae los lodos que superan la altura indicada. En la parte superior, se ha colocado el accesorio de alta tasa de remoción, a 30 cm debajo de la superficie del agua. La altura del accesorio en tubos de 6.5cm de diámetro y de altura 70 cm. En la investigación antecedente, se determinó que la eficiencia en remoción de partículas floculentas, es semejante a la de módulos comerciales.

Este proceso es importante, ya que remueve el 80% de las partículas. También se destaca la remoción de DQO, color, turbidez.

Se determinó que en el efluente se incrementó la concentración del amoníaco; posiblemente por la pre oxidación con H_2O_2 .

C.- Filtración.

Consiste en una tubería de 6 cm de diámetro de acrílico, el influente al filtro se realiza por el falso fondo: Sobre la placa perforada en la arriba, se han colocado capas de grava iniciando con un diámetro de 1", espesor 15cms, después tres capas con diámetro descendente, 7.5 cms. Cada una y al final una de grasón. Esta base sirve como sostén del medio filtrante y para repartir uniformemente el agua de retrolavado. El medio filtrante consiste de arena sílica de 1mm de diámetro (para la segunda etapa se ha considerado colocar una capa de 30 cm de antracita; que además de mejorar la remoción de flocs pequeños, también funcionará como pre filtro y prolongar la carrera (en el plano se anotan las dimensiones del modelo semipiloto).

D.- Columnas de Carbón Activo (C.A.).

Son dos columnas de C.A. con 1.40m de adsorbente, ambos con flujo descendente, también se soporta por capas de grava. En todos los procesos, se han colocado válvulas a cada 30 cms de separación para toma de muestras y definir la concentración de contaminantes a diferentes profundidades.

E.- Aireación con micro burbujas.

Como se ha obtenido variación de SSV, DBO y NH_3-N , los cuales se incrementan después de la sedimentación o de la filtración, se ha determinado instalar una columna para inyectar micro burbujas de aire en los puntos críticos (2ª etapa), para remover SSV, NH_3-N y oxidar materia orgánica medida como DBO_5 total y DQO total.

F.- Rayos UV.

La radiación UV que está en el tren de tratamiento funciona como bactericida de las bacterias que se encuentran presentes.

G.- Ozonación.

Consiste en dos tubos concéntricos, el exterior es de 6 cm de diámetro y el interior de 4.0 cm, con una altura de 1.20m con un tiempo de detención de 8.8min. Para la 2ª fase se duplicará este tiempo.

9.1.2 Características Físicas Hidráulicas.

Las características físicas hidráulicas de cada proceso de la Planta Semipiloto que se consideran son las siguientes: diámetro (m), área (m²), carga hidráulica (m³/m² día), flujo (ml/s), porosidad (%), altura (m), volumen (m³), y tiempo de detención (min). Las cuales se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Características Físicas hidráulicas de la Planta Semipiloto.

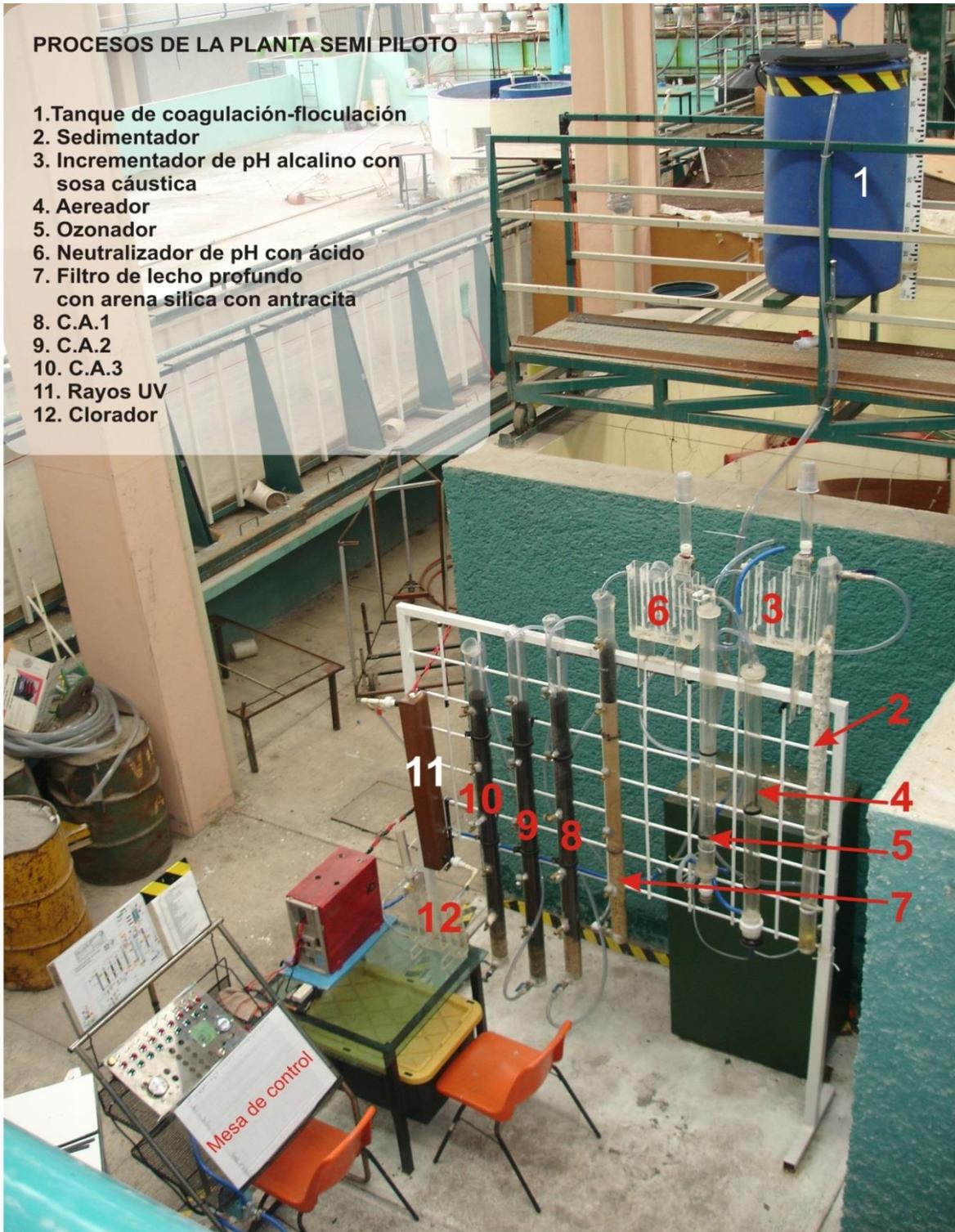
| PROCESO | DIÁMETRO (m) | Área (m ²) | CH m ³ /m ² día | Q ml/s | Porosidad (%) | Vol (m ³). | h (m) | T de detención/min. |
|---------------------------|-------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|--------|---------------|------------------------|-------|---------------------|
| Sedimentador | 0.06 | 0.00283 | 90 | 2.94 | | 0.0045 | 1.6 | 25.7 |
| Filtro de arena | 0.06 | 0.00283 | 90 | 2.94 | 50 | 0.00345 | 1.57 | 19.6 |
| Filtro de C.A.I | 0.045 | 0.0016 | 90 | 2.94 | 80 | 0.00179 | 1.4 | 5.75 |
| Filtro de C.A. II | 0.045 | 0.0016 | 90 | 2.94 | 80 | 0.00179 | 1.2 | 5.75 |
| Ozonador | 0.04 int. 0.60 ext. | 0.0013 0.2827 | 90 | 2.94 | | 0.00156 | 1.2 | 8.84 |
| *Aireación micro burbujas | 2ª etapa Se cambiará de posición | | | | | | | |
| Rayos UV | 0.06 | 0.00283 | 90 | 2.94 | | | | |
| Cloración | 0.06 | 0.00283 | 90 | 2.94 | | 0.00179 | 1.5 | 10 |

Nota:

* = 2ª etapa.

9.1.3 Fotografía de la Planta Semipiloto.

En la fotografía se muestra la planta semipiloto con todos los equipos de los procesos los cuales se encuentran enumerados con sus respectivos nombres.



10 Discusión de Resultados de los Valores y las Figuras de los Parámetros Seleccionados.

Turbiedad

Los resultados que obtuvimos en la turbiedad está en el rango de 0.112 (11.2%) a 0.826 (82.6%) considerando como baja y alta respectivamente.

Los valores mostraron un comportamiento descendente hasta la columna C.A.1; en la columna C.A.2, se tiene un ascenso de 1.13L a 1.35; siguiendo un descenso hasta el proceso de rayos UV, con valor de 0.300 y en el último proceso, cloración se elevó a 0.319. El comportamiento de los valores se pueden observar en la tabla 8.

Tabla 8. Valores medios tomados del cuadro 1 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A. 1 | C.A. 2 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|----------------------|---------------------|--------------|---------------|---------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|
| Med=4.63 | 1.644 | 1.28 | 1.13 | 1.35 | 0.616 | 0.345 | 0.300 | 0.379 |
| $\delta_{n-1}= 1.44$ | 0.972 | 1.033 | 0.734 | 0.151 | 0.233 | 0.202 | 0.170 | 0.150 |
| CV=0.312 | 0.591 | 6.826 | 0.650 | 0.112 | 0.386 | 0.585 | 0.561 | 0.398 |

La turbiedad se relaciona con la concentración de materia suspendida esto es, se debe tener un incremento, en los procesos de rayos UV y en el de cloración; lo cual puede ser porque en los análisis se tenga errores humanos o bien, que debido al tiempo en el cual el sistema no funcionaba (sábados y domingos) se tuviese una generación de materia suspendida, esto se debe detectar también en los valores del parámetro de sólidos suspendidos totales y en el de sólidos suspendidos volátiles. Lo cual se ve reflejado en la figura 5.

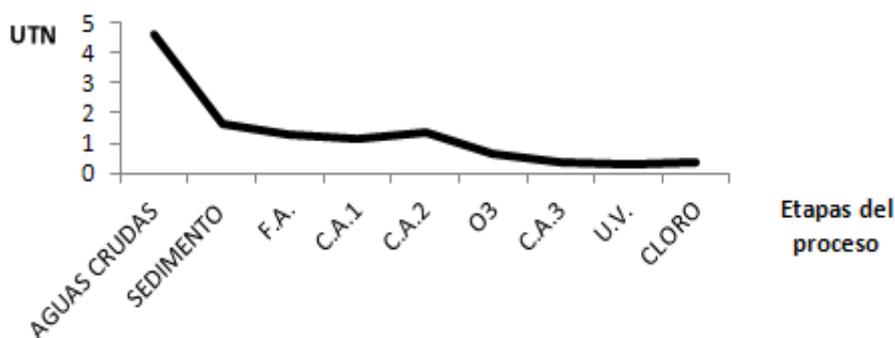


Figura 5. Turbiedad en cada etapa del sistema.

Color unidad Pt-Co

El color se debe a la materia en solución, según este origen, se tiene una remoción descendente en cada proceso. Así como se puede observar en la tabla 9.

Tabla 9. Valores medios tomados del cuadro 2 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A.1 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|-----------------------|---------------------|-------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=90.54 | 48.45 | 44.5 | 12.9 | 7.0 | 1.70 | 1.56 | 1.11 |
| $\delta_{n-1}= 22.41$ | 18.61 | 16.76 | 11.27 | 5.19 | 1.64 | 3.17 | 1.83 |
| CV=0.25 | 0.384 | 0.38 | 0.87 | 0.73 | 0.96 | 2.00 | 1.65 |

El coeficiente de variabilidad está en el rango de 0.25 (25%) a (200%) éste es de un valor muy alto. El valor de 200% se obtuvo en el proceso de UV, esta variabilidad se debe a que el rango de valores es de 0 a 8; predominio de los valores 0.

El tener alta la variabilidad no es indicativo de que tenga una realidad este valor; se debe interpretar, mejor como el tener varios valores en cero y unos pocos con valores de 8 y 6; que incide en la δ_{n-1} , se ve que la diferencia del valor medio con respecto a los valores en cero, se deberá atender la ubicación de las columnas de C.A. Esto se puede apreciar en la figura 6.

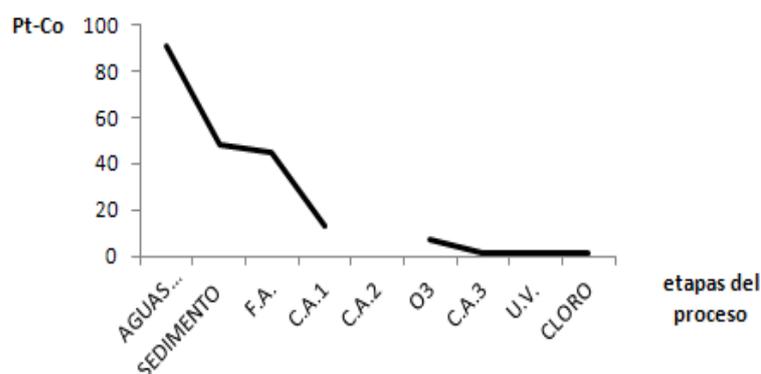


Figura 6. Colorimetría en cada etapa del sistema.

La eficiencia global es de 98.8%, que se considera excelente. Los valores de los cuatro últimos procesos están por debajo de los fijados por la NOM-127-SSA1-1994, que es de 20 unidades Pt-Co. El efluente de la planta semipiloto tiene un valor de 1.11 que es menor del permisible.

DQO

Los valores de las concentraciones, disminuyen en cada proceso con excepción de la cloración que se incremento de 5.93 (penúltimo proceso) a 8.24 mg/l en la cloración (último proceso). Es posible por la concentración residual baja del cloro, ya que debe tener una dosis que oxide a las cloraminas y amonias, lo cual coincide en la remoción de materia orgánica medida como DQO. El coeficiente de variabilidad está en el rango de 15.4% a 94.3%, se interpreta como bajo a alto. No está considerada en la norma seleccionada para evaluar el comportamiento de la planta semipiloto, pero se obtuvieron los siguientes datos en mg/l de la tabla 10, donde se observa que es alto, debido a la alta concentración del influente.

Tabla 10. Valores medios de DQO, tomados del cuadro 3 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A. 1 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|-----------------------|---------------------|-------------|---------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=54.42 | 41.98 | 38.5 | 13.30 | 13.02 | 7.14 | 5.93 | 8.24 |
| $\delta_{n-1}= 10.85$ | 6.87 | 5.94 | 5.74 | 5.51 | 5.23 | 5.59 | 6.19 |
| CV= 19.95 | 16.4% | 15.4% | 43.6 | 42.4 | 82% | 94.3% | 75% |

La presencia de las bajas concentraciones, muestran que si tienen materia orgánica, la cual no fue removida, es factible que incrementando la dosis de cloro, el tiempo de detención en el ozonador, sea posible removerla en su totalidad, el valor mínimo obtenido que de 5.93mg/l, en los UV incrementándose con la cloración a una concentración de 8.24mg/l, esto se puede observar en la figura 7.

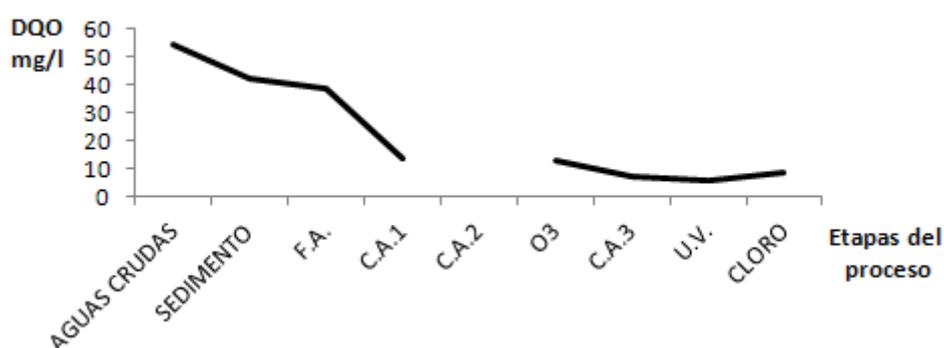


Figura 7. DQO en cada etapa del sistema.

Se debe tener presente en la segunda etapa o fase de la investigación para considera otros procesos que la abatan en su totalidad. En el sistema semipiloto se tuvo una eficiencia global en remoción del 80.4%, que se considera como adecuada.

Sulfatos mg/l

Los valores de las concentraciones son erráticos, muestran disminución y aumentos de la concentración, no se tiene consistencia en el tren de procesos antecedentes y congruentes.

Los coeficientes de variabilidad son pequeños, y muestran consistencia en los valores obtenidos, los cuales se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Valores medios de sulfatos mg/l, tomados del cuadro 4 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A.1 | C.A.2 | O ₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|----------------------|--------------|------|-------|-------|----------------|-------|------|-------|
| Med=90.04 | 89.12 | 86.1 | 80.45 | 86.4 | 83.1 | 83.1 | 91.1 | 83.49 |
| $\delta_{n-1}= 6.68$ | 7.28 | 8.08 | 7.22 | 5.03 | 5.66 | 3.26 | 3.46 | 6.58 |
| CV= 7.41% | 8.1% | 9.4% | 9.0% | 5.8% | 6.8% | 3.9% | 3.8% | 7.9% |

Las concentraciones en los diferentes procesos son menores a la concentración máxima permisible por la normatividad.

La eficiencia global en la concentración de sulfatos fue de 7.2%. En la figura se muestra el comportamiento de estas concentraciones.

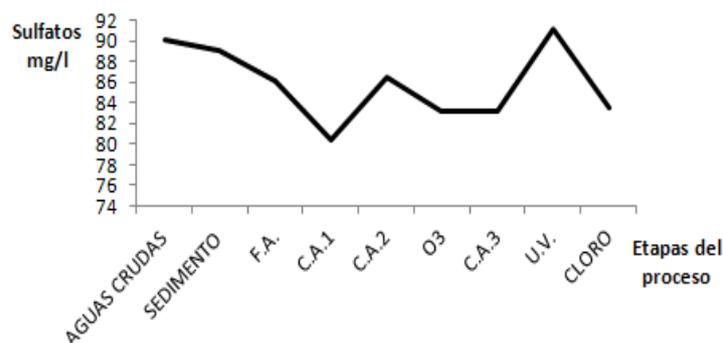


Figura 8. Sulfatos mg/l en cada etapa del sistema.

pH

Los valores del pH estuvieron en el rango de 7.46, en las aguas crudas, a 8.34 en el proceso de ozonación y en el último proceso efluente del tren fue de 8.03, los cuales se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Valores medios de pH (unidades de pH), tomados del cuadro 5 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A.1 | C.A.2 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|-----------------------|---------------------|-------------|--------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=7.46 | 7.90 | 7.89 | 7.87 | 7.81 | 8.34 | 8.30 | 8.22 | 8.03 |
| $\delta_{n-1}= 0.224$ | 0.207 | 0.205 | 0.23 | | 0.127 | 0.221 | 0.24 | 0.25 |
| CV= 0.031 | 0.026 | 0.026 | 0.079 | | 0.015 | 0.027 | 0.029 | 0.031 |

El coeficiente de variabilidad resultó pequeño con valores de 0.015 (1.5%) a 0.031 (3.1%), el cual indica que los datos considerados conservan una uniformidad sin variaciones notables.

Con respecto a los valores recomendados por la normatividad se encuentran dentro del rango permisible. No se obtuvieron valores debajo de 7.0, y se pueden ver en la figura 9.

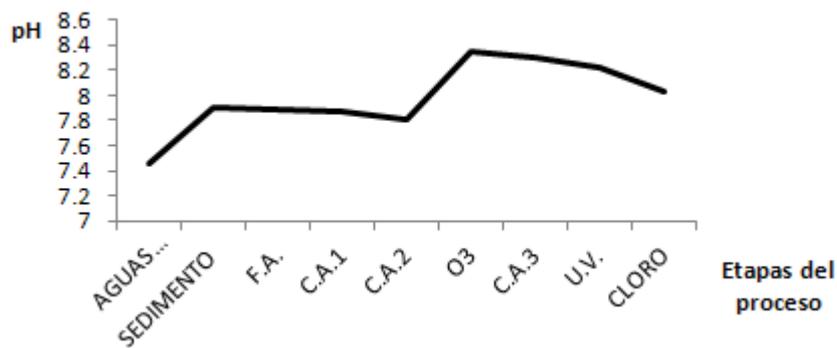


Figura 9. pH (unidades de pH) de cada etapa del sistema.

NH₃-N en mg/L

Los valores del NH₃-N presentan una situación errática; no se tiene una conducta, que permita tomar una idea de la que ocurre en el sistema. Se tiene una conducta, que permita tomar una idea de la que ocurre en el sistema. Se tienen valores pico en la columna C.A.1 con una concentración de 3.445; el otro valor pico se detecta en el proceso de cloración, con un valor 5.51, los valores bajos se localizan en el sedimentador y filtro rápido de arena de 1.85 mg/L. Otra concentración mínima se localizó en el proceso de ozonación (4to. Proceso) con una concentración de 1.821 mg/L, lo cual se puede ver en la tabla 13.

Tabla 13. Valores medios del NH₃-N (mg/l), tomados del cuadro 6 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A.1 | O ₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|-------------------------|--------------|------|-------|----------------|--------|-------|-------|
| Med=2.28 | 1.85 | 1.85 | 3.445 | 1.821 | 2.30 | 3.93 | 5.51 |
| δ _{n-1} = 2.84 | 2.43 | 2.98 | 3.84 | 2.381 | 2.68 | 3.24 | 4.47 |
| CV= 125% | 131% | 161% | 112% | 130% | 116.5% | 82.4% | 81.2% |

En este proceso se tienen incrementos en los tres últimos procesos con concentraciones de 2.30 mg/L; 3.93mg/L y 5.51mg/L (Columna C.A.3, UV y cloración, respectivamente), esto indica que los procesos en lugar de un abastecimiento, sucedió lo contrario, y se puede observar en la figura 10.

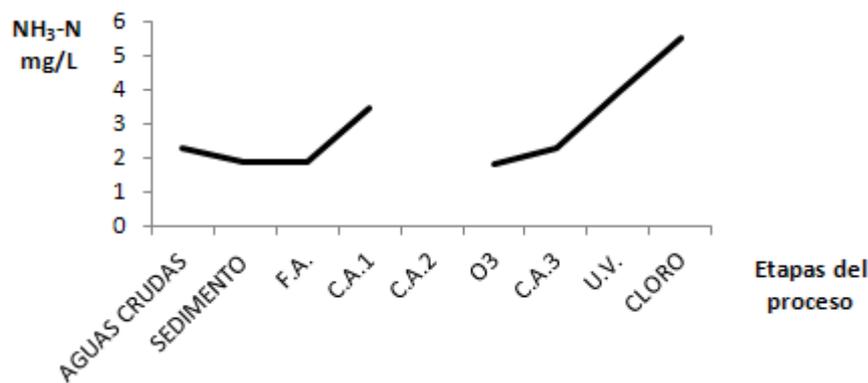


Figura 10. NH₃-N en mg/L de cada etapa del sistema.

NO₂-N en mg/L

Los valores de la concentración de NO₂-N, tienen un comportamiento errático, después de un descenso en la concentración hasta el filtro de arena (proceso 2) le siguen los picos con concentraciones de 0.906 y 1.92 mg/L correspondientes a los procesos de la columna C.A.1 y ozonador respectivamente para después descender a una concentración de 1.74 mg/L, en el proceso de cloración (efluente del sistema). Se pueden ver estos valores en la tabla 14.

Tabla 14. Valores medios **NO₂-N en mg/L**, tomados del cuadro 7 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A.1 | C.A.2 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|-------------------------|---------------------|-------------|--------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=0.834 | 0.776 | 0.737 | 0.909 | | 1.92 | 1.80 | 1.76 | 1.74 |
| δ _{n-1} = 0.75 | 0.701 | 0.71 | 0.722 | | 0.238 | 0.80 | 1.029 | 0.79 |
| CV= 90% | 91% | 96% | 79.7% | | 124% | 45% | 58.9% | 45% |

La concentración presenta una situación errática; no se tiene máxima permisible por la NOM-127-SSA1, ya que es de 1.0 mg/L, sin embargo en los cuatro últimos procesos, la concentración es superior a la norma, lo cual se puede ver la tendencia por medio de la figura 11.

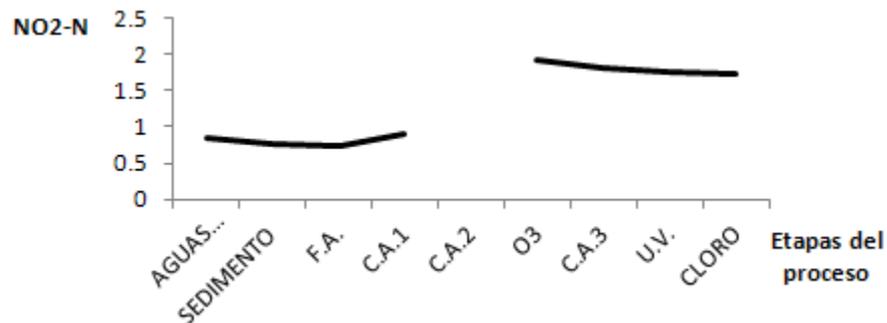


Figura 11. **NO₂-N en mg/L de cada etapa del sistema.**

Conjuntamente con el parámetro NH₃-N se detectan puntos críticos en el inicio del incremento de la concentración de estos dos parámetros. Analizando ambos cuadros, el sitio indicado para remover NH₃-N, es antes del filtro de arena, o antes de la columna de C.A. 1, ya que después de estos procesos tienen lugar los incrementos de las concentraciones.

Es posible que incrementando la remoción por micro burbujas y la adición de cloro entre al rango recomendado.

NO₃-N en mg/L

Los valores de las concentraciones tienen un comportamiento errático, ya que, de un valor inicial de 5.6 mg/L desciende a 2.74 mg/L a la columna de C.A.1, donde

inicia un incremento hasta el proceso de cloración con una concentración de 6.65mg/L, lo cual se puede ver en la tabla 14

Tabla 14. Valores medios de **NO₃-N (mg/L)**, tomados del cuadro 8 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A.1 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|----------------------|---------------------|-------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=5.6 | 5.51 | 4.21 | 2.74 | 3.48 | 4.56 | 5.14 | 6.65 |
| $\delta_{n-1}= 3.43$ | 4.10 | 2.72 | 2.16 | 1.61 | 1.63 | 1.47 | 0.97 |
| CV= 61.2 % | 75% | 64.7% | 18.7% | 46.5% | 35.7% | 28% | 14.6% |

En la figura 12 se puede ver el comportamiento de la concentración del NO₃-N, la tendencia que tiene en cada etapa del proceso.

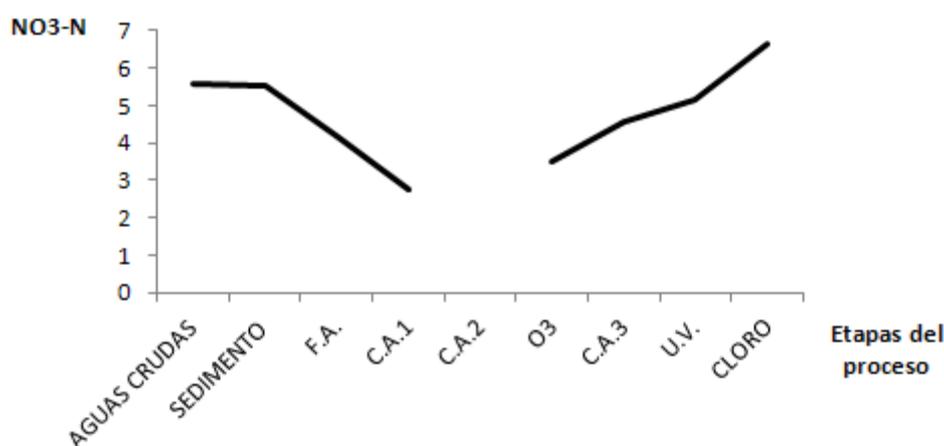


Figura 12. NO₃-N en mg/L, de cada etapa del sistema.

Los coeficientes de variabilidad están en el rango de 14.6% a 78.7%, esto es de porcentajes pequeños a valores grandes en general muestran que el comportamiento es extraño.

No es fácil obtener una conclusión acerca de esta variación. Posiblemente removiendo NO₄ se logre bajar la concentración.

Ya se ha agregado los nuevos procesos de microburbujas y primero un accesorio que elevará el pH a valores de 11-12 y después de la aireación otro accesorio lo bajará a un valor de 7-7.5

El valor máximo permisible por la normatividad es de 10mg/L los valores del cuadro resumen se encuentran por este valor.

Sólidos totales en mg/L

También se presentan valores descendentes hasta el proceso de C.A.1 y después de esto, los valores ascienden hasta la cloración (efluente del sistema), este comportamiento se puede ver en la tabla 15.

Tabla 15. Valores medios de **Sólidos totales (mg/L)**, tomados del cuadro 9 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A.1 | O ₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|----------------------|--------------|-------|-------|----------------|-------|-------|--------|
| Med=55.3 | 541.1 | 543.3 | 518.2 | 518 | 497.1 | 502.8 | 506.36 |
| $\delta_{n-1}= 37.6$ | 32.1 | 38.1 | 40.81 | 26.68 | 40.48 | 40.84 | 40.64 |
| CV= 7.0 % | 6.0% | 7.0% | 7.5% | 5.1% | 8.1% | 8.1% | 8.0% |

Los coeficientes de variabilidad son bajos, indicadores de la uniformidad de los valores de sólidos totales, los cuales se pueden apreciar en la figura 12.

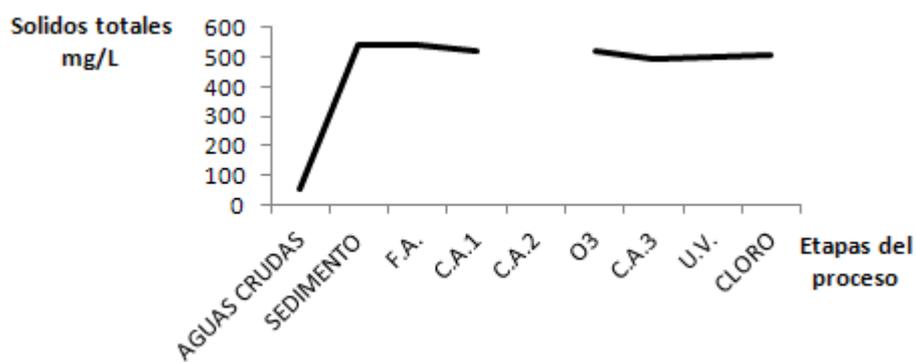


Figura 12. NO₃-N en mg/L, de cada etapa del sistema.

Los valores anotados cumplen con la concentración máxima permisible de la normatividad, siendo que recomienda una concentración máxima de 1000mg/L.

Sólidos totales volátiles en mg/L

En el sistema se remueve un 30% de los sólidos totales volátiles, la concentración en el influente (aguas crudas) es de 126.5 mg/L y la del efluente es de 88.0 mg/L, así como se puede observar en la tabla 16.

Tabla 16. Valores medios **Sólidos totales volátiles (mg/L)**, tomados del cuadro 10 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A. 1 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|-----------------------|---------------------|-------------|---------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=126.5 | 114.18 | 111.64 | 109.1 | 95.55 | 88.40 | 94 | 88 |
| $\delta_{n-1}= 12.04$ | 21.49 | 15.33 | 19.57 | 14.11 | 22.16 | 17.9 | 17.8 |
| CV= 9.5 % | 18.8% | 13.7% | 18.1 | 14.3% | 25% | 19.1% | 20.2% |

La materia volátil está constituida principalmente por material orgánica y un pequeño porcentaje de ácidos y gases susceptibles de ser removidos 100°C. Los coeficientes de variabilidad son pequeños, lo que confirma la buena relación entre los diferentes procesos, lo cual se puede apreciar en la fig. 13.

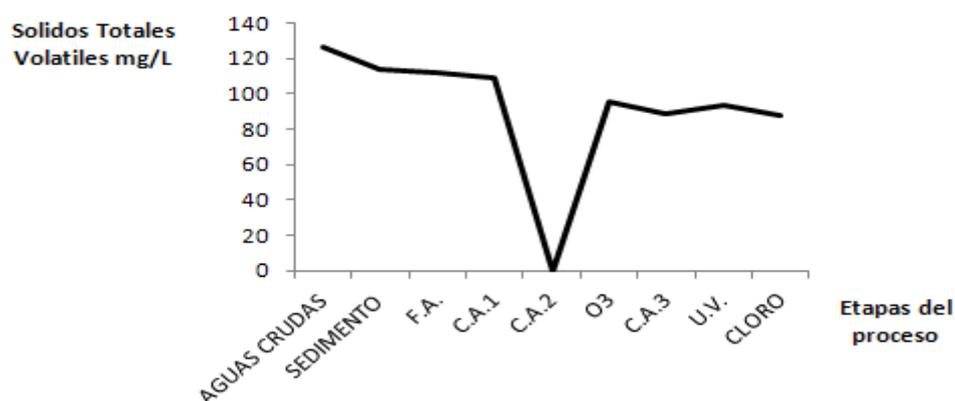


Figura 13. Sólidos totales volátiles (mg/L), de cada etapa del sistema.

La eficiencia global en remoción de Sólidos totales es de 30.5% que no es mala considerando lo complejo de la materia subproducto, de los diferentes procesos. La concentración de 88 mg/L se puede disminuir en los procesos de adsorción aireación microburbujas y en los procesos de oxidación avanzada, se deberá tener especial atención a estos procesos, incrementando el tiempo de contacto.

Sólidos fijos totales en mg/L

Se tienen puntos picos entre los procesos, como en el filtro de arena, la ozonación y en la cloración que es el proceso final del tren, esto se ve reflejado en la tabla 17.

Tabla 17 Valores medios **Sólidos fijos totales mg/L** tomados del cuadro 11 del apéndice A

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A. 1 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|----------------------|---------------------|-------------|---------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=425.4 | 426.9 | 431.6 | 408.4 | 420 | 415.3 | 408.5 | 417.8 |
| $\delta_{n-1}= 34.5$ | 26.8 | 31.7 | 30.3 | 26 | 30.7 | 38.7 | 28.8 |
| CV= 8.2 % | 6.2% | 7.3% | 7.4% | 6.2% | 7.4% | 9.5% | 6.9% |

Se debe tener atención a estos valores picos, posiblemente se deba a que los sábados y domingos, no se operaba, es decir se suspendía la alimentación al sistema; lo que hace pensar que la materia orgánica retenida en los medios filtrantes provocaba la disminución de la materia lentamente biodegradable incrementando las variaciones en los valores de un proceso a otro, que en lugar de tener un abatimiento, estas variaciones se pueden analizar por medio de la figura 13.

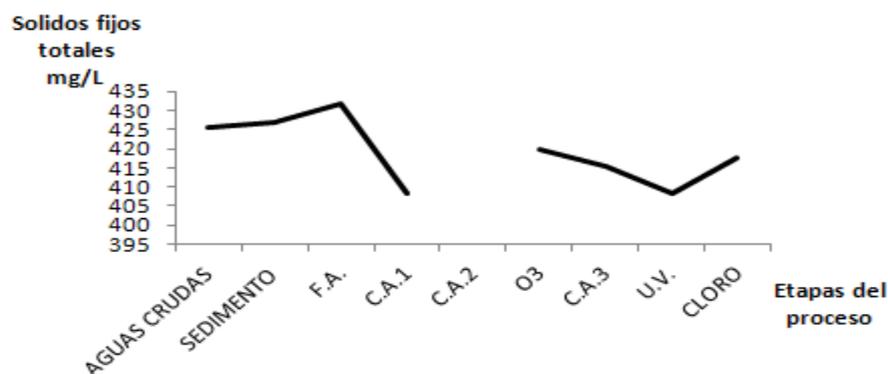


Figura 14. Sólidos totales volátiles (mg/L), de cada etapa del sistema.

Los coeficientes de variabilidad son pequeños indicadores de la buena relación de los valores obtenidos en los diferentes procesos del sistema.

La eficiencia global en remoción no es relevante se tiene un porcentaje del 1.8% en remoción de sólidos totales fijos.

Sólidos Suspendidos Totales en mg/L

La concentración sigue un modelo descendente de proceso a proceso. Aunque la normatividad no contempla este parámetro el valor de la concentración en el efluente se considera aceptable, con valor de 1.24mg/L. La eficiencia global en remoción de sólidos suspendidos totales es de 82.2%, lo cual se expresa en la tabla 18.

Tabla 18. Valores medios **Sólidos Suspendidos Totales mg/L** tomados del cuadro 12 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A.1 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|----------------------|---------------------|-------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=7.4 | 7.45 | 4.78 | 4.18 | 2 | 0.727 | 1.27 | 1.24 |
| $\delta_{n-1}= 6.18$ | 607 | 5.09 | 2.68 | 2.14 | 0.618 | 1.85 | 142 |
| CV= 84 % | 82% | 106.5% | 64% | 107% | 222% | 145.6% | 118% |

Los coeficientes de variabilidad, aunque son altos no manifiesta una variación entre los datos obtenidos más bien se debe a que conforme se incrementan por los valores cero; la variabilidad se incrementa por este motivo. Se observa que en los últimos procesos, con mayoría de valores cero el coeficiente de variabilidad se incrementa, cuando en realidad se debe tener una buena relación entre los valores que conforman el cuadro 12 del apéndice A y que se puede visualizar en la figura 15.

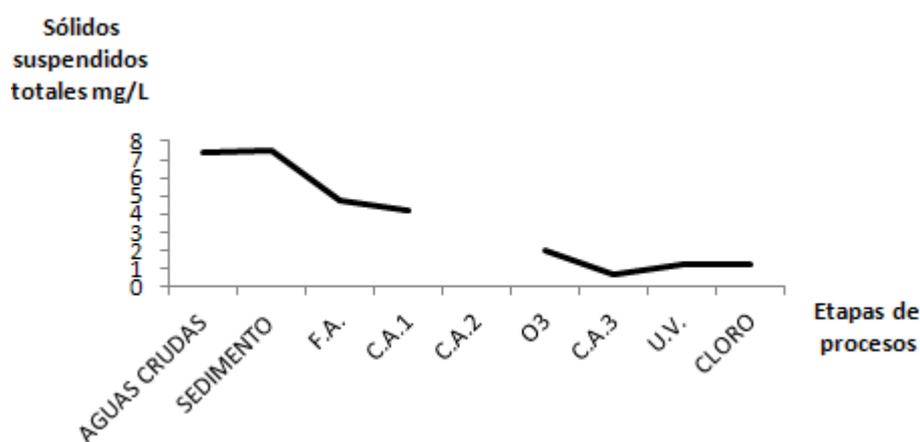


Figura 15. **Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)**, de cada etapa del sistema.

Sólidos Suspendidos Fijos en mg/L

El comportamiento parece errático, como las concentraciones son pequeñas se tienen varias concentraciones cero y se refleja en la figura 16, esto hace que las medias presentan variaciones de proceso a proceso, dichas variaciones se pueden observar en la tabla 19.

Tabla 19. Valores medios **Sólidos Suspendidos Fijos mg/L** tomados del cuadro 13 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A.1 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|----------------------|---------------------|-------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=0.909 | 2 | 2.56 | 0.909 | 1.45 | 0.453 | 0.818 | 0.636 |
| $\delta_{n-1}= 2.07$ | 2.98 | 4.39 | 1.446 | 1.86 | 1.213 | 1.47 | 0.924 |
| CV= 228 % | 149% | 171.5% | 159% | 129% | 267% | 179.8% | 145.8% |

La eficiencia global de remoción es de 30%, y la concentración en el efluente es de 0.636 mg/L, el cual se puede ver en la figura 16.

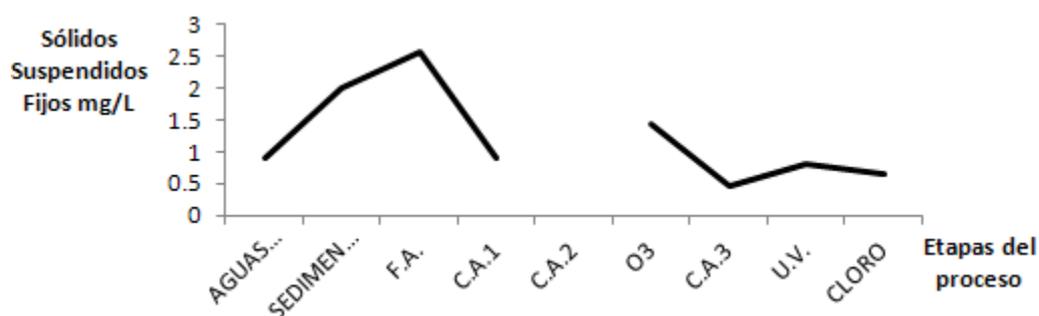


Figura 16. Sólidos Suspendidos Fijos (mg/L) de cada etapa del sistema.

Sólidos Suspendidos Volátiles mg/L

Los valores de las concentraciones presentan un comportamiento errático; el origen de ello se debe a que la planta semipiloto, no fue operada de forma

continua, los sábados y domingos no se operó por lo que es de esperarse que durante este lapso tuvieron lugar reacciones bioquímicas de la materia retenida en los medios filtrantes. Estos valores se presentan en la tabla 20.

Tabla 20. Valores medios **Sólidos Suspendidos Volátiles mg/L** tomados del cuadro 14 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A.1 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|----------------------|---------------------|-------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=6.91 | 4.73 | 2.80 | 3 | 0.545 | 0.242 | 0.545 | 0.636 |
| $\delta_{n-1}= 8.07$ | 3.93 | 3.64 | 2.98 | 0.934 | 0.90 | 1.507 | 1.286 |
| CV= 117 % | 50.8% | 130% | 99% | 171% | 372% | 277% | 202% |

La remoción global es de 91% , indica el buen funcionamiento del sistema, como remover lo del parámetro sólidos suspendidos volátiles, por lo que se puede ver en la figura 17.

Los coeficientes de variabilidad resultaron altos debido a lo anotado en las páginas anteriores.

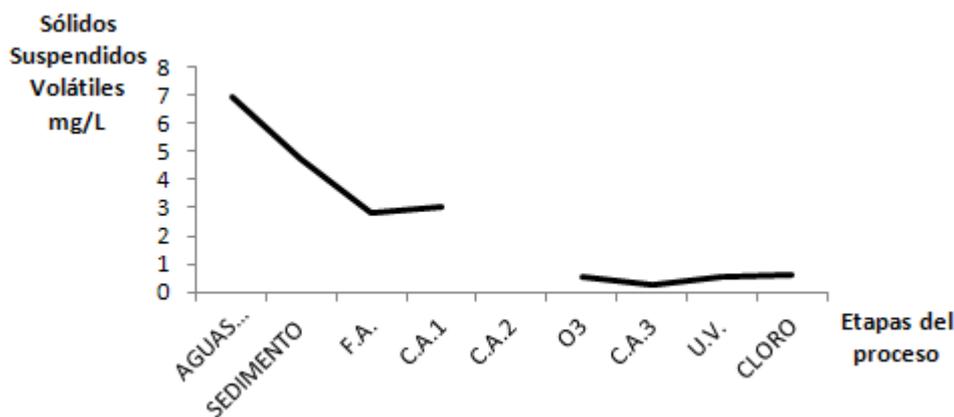


Figura 17. Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/L) de cada etapa del sistema.

Sólidos Disueltos Totales mg/L

Los valores de las concentraciones de sólidos disueltos sigue una concentración errática, se presentan picos después de valores bajos, en los dos últimos procesos la concentración se eleva, ver tabla 21

Tabla 21. Valores medios **Sólidos Disueltos Totales mg/L** tomados del cuadro 15 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A.1 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|----------------------|---------------------|-------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=546.7 | 533.7 | 529.55 | 514 | 516 | 496.4 | 501.4 | 504.73 |
| $\delta_{n-1}= 37.4$ | 29.09 | 30.23 | 39.49 | 77.17 | 41.04 | 40.5 | 41.14 |
| CV= 6.8 % | 5.4% | 5.7% | 7.7% | 5.3% | 8.3% | 8.1% | 8.2% |

La eficiencia global en remoción de sólidos disueltos es de 7.7%, porcentaje bajo a pesar de tener varios procesos que deberían proporcionar una eficiencia adecuada.

Los coeficientes de variabilidad son bajos, lo que permite aseverar que los valores del cuadro 15 del apéndice tienen una relación adecuada, manifiestan que entre ellos se tienen una buena uniformidad, ver la figura 18.

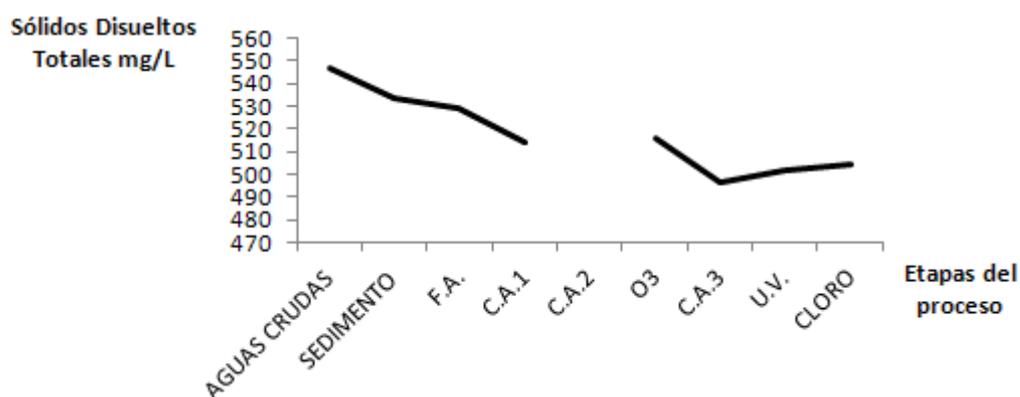


Figura 18. Sólidos Disueltos Totales mg/L de cada etapa del sistema.

Coliformes totales NMP/100ml

Los valores de este parámetro se encuentran en el cuadro 16 del apéndice A, en el cual, no se determinaron las medias, desviación estándar y coeficientes de variabilidad, ya que el mayor número de datos tienen un valor de <3, lo cual no ha

sido explicado por el laboratorio, ya que los valores 2.1 0 son menos de 3, este parámetro deberá ser verificado o justificado.

En este caso se ha considerado como cero. Por lo que la eficiencia del sistema es de 100%.

DBO en mg/l

Los valores de este parámetro se encuentran en el cuadro 17 del apéndice A, de los cuales destacan los siguientes puntos:

- a) Aguas crudas se dispone de un dato con un valor de 8mg/l.
- b) En el sedimentador se tienen con un valor de la concentración de <3, como en los casos anteriores los valores de 2, 1, 0 son menores a <3, la interpretación será solicitado al laboratorio.
- c) Filtro de arena sin datos.
- d) Columna de C.A. 1, con un solo dato con valor de 8mg/l, igual que el caso que el de aguas crudas.
- e) Columna C.A. 2, sin datos.
- f) Ozono con los valores de <3 mg/l, misma interpretación que el punto b.
- g) Columna C.A. 3, sin datos.
- h) UV, con un solo dato con valor <3 mg/l, mismo caso que el punto b.
- i) Cloración en el cual se tiene una media de 6.0mg/l, cuatro valores, en desviación estándar de 5.29 y un coeficiente de variabilidad de 88%, que es alta, los cuatro valores ahí consignados no tienen una buena relación por lo que se considera como valores dudosos.

Coliformes Totales Colis/100mg/l.

Análisis realizados por el laboratorio Certificado de la Facultad de Química. El cuadro 19 del apéndice A dispone de algunos valores de un laboratorio certificado.

Para comprobar el sistema de coliformes totales se mandó la muestra al laboratorio certificado de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México. Los valores se disparan sobre una concentración de coliformes en el proceso de loración con una concentración media de 11.3 colis/100ml, cn una desviación estándar de 23.1 colis/100ml y coeficiente de variabilidad de

142%, valores que no coinciden con las concentraciones en los procesos antecedentes en que los valores están en el rango de

<1.1 a <3, en la segunda etapa se deberá prestar especial atención, pues las concentraciones del cuadro 19, no tienen una relación razonable.

Cloro residual mg/L.

En los diferentes procesos de la planta semipiloto, del cuadro 20 del apéndice A, se han elegido los valores de las medias, desviaciones estándar y coeficientes de variabilidad, los cuales se presentan en la tabla 22.

Del proceso aguas crudas hasta el de UV, se tiene un abatimiento razonable, el cloro inicial se debe al adicionado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales Toluca Norte. En el proceso de cloración de la planta semipiloto se debe adicionar el cloro.

Tabla 22. Valores medios **cloro residual mg/L** cuadro 20 el apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A.1 | C.A.2 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|------------------------|---------------------|-------------|--------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=0.123 | 0.045 | 0.090 | 0.012 | 0.005 | 0.0415 | 0.005 | 0.0025 | 1.03 |
| $\delta_{n-1} = 0.019$ | 0.026 | 0.046 | 0.012 | 0.01 | 0.064 | 0.064 | 0.61 | 0.364 |
| CV= 15.3% | 58.8% | 52.1% | 100% | 200% | 135% | 135% | 200% | 35.3% |

El cloro residual con un valor de 1.03 mg/L, no es lo suficiente para eliminar NH₃-N, NO₃, ver figura 19.

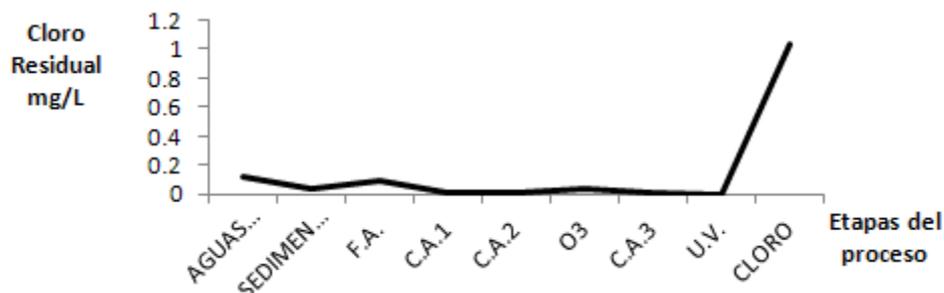


Figura 19 Cloro residual mg/L de cada etapa del sistema.

10.1 Resumen comparativo de la interpretación de resultados de los valores y figuras anteriores.

Se realizaron las corridas experimentales, en las que determinaron valores a los parámetros que estaban arriba de la normatividad. Al final se realizaron los análisis físico-químicos en un laboratorio certificado. En la tabla 23 se muestra la comparación del influente y el efluente.

Tabla 22. Valores de los parámetros del influente, efluente y los máximos permisibles.

| Parámetro | Influente planta semipiloto | Efluente planta semipiloto | Concentración máxima permisible NOM-127-SSA1-1994 | η % |
|-------------------|-----------------------------|----------------------------|---|----------|
| Color | <2.5 | <2.5 | 26 | 0 |
| Turbiedad | <2.5 | <2.5 | 5 | 0 |
| Cloro residual | 0.025 | <0.20 | 2.5 | - |
| Nitratos IV | 6.0 | 4.3 | 10.0 | 28 |
| Nitritos IV | 0.080 | 0.58 | 1.0 | -71* |
| Amonia IV | 0.31 | 29.1 | 0.5 | -93* |
| SNT | 510 | 484.6 | 1000 | 5 |
| pH insitu | 7.5 | 7.52 | 6.5-8.5 | - |
| Detergentes SAA14 | <0.1 | 0.124 | 0.50 | -140* |
| Aluminio | <0.1 | <0.001 | 20.0 | - |
| Arsénico | <0.0016 | <0.001 | 0.0025 | - |
| Bario | <0.002 | <0.3 | 0.70 | - |
| Cadmio | <0.002 | <0.1 | 0.005 | - |
| Cianuros | <0.02 | <0.02 | 0.07 | - |
| Cloruros | 33.46 | 84.37 | 250 | -60 |
| Cobre | <0.01 | <0.01 | 2.0 | - |
| Cromo Total | <0.006 | <0.1 | 0.05 | - |
| Dureza Total | 199.9 | 133.12 | 500 | 33 |
| Fenoles | <0.001 | <0.001 | 0.30 | - |
| Hierro | <0.1 | <0.1 | 0.30 | - |
| Fluoruros | <0.1 | <0.315 | 1.50 | -68 |
| Manganeso | <0.1 | <0.10 | 0.15 | - |
| Mercurio | <0.005 | <0.001 | 0.001 | - |
| Zinc | <0.1 | <0.116 | 5.00 | - |
| Plomo | <0.001 | <0.01 | 0.01 | - |
| Sodio | 50.0 | 130 | 200 | -61 |
| Sulfatos | 72.8 | 67.7 | 400 | 5 |
| DBO | 8.0 | <0.5 | N.A. | 100 |

| | | | | |
|---------------------------|-------------|------|-------------|------------|
| DQO | 38.0 | - | - | - |
| Coliformes totales | 43 | <1.1 | N.A. | 100 |
| Coliformes fecales | 43 | <1.1 | N.A. | 100 |

11. Conclusiones

Las concentraciones obtenidas cumplen con la normatividad.

El Amonia-N de 0.31 subió a 29.1ppm, debido a que este valor está arriba de las concentraciones máximas permisibles.

La concentración de cloro no fue lo suficiente para oxidar al $\text{NH}_3\text{-N}$; como lo indican las recomendaciones de diseño.

Esta anomalía será base para considerar los procesos de aireación con microburbujas a pH en el rango de 10.5-11

Incrementar la dosis de cloro para obtener un residual libre de 1.50mg/L (Norma 127-SSA-1). Esto implica aumentar la dosis, para oxidar conjuntamente con el microburbujeo la concentración de $\text{NH}_3\text{-N}$ a valores debajo de 0.5mg/L que es la concentración máxima permisible por la norma de referencia. Por lo tanto se adicionaron al tren de tratamiento, los siguientes complementos: un aireador y ozonador (ambos con microburbujas), así como rayos U.V., para remover el Amonia-N, los cuales se pueden observar a continuación:

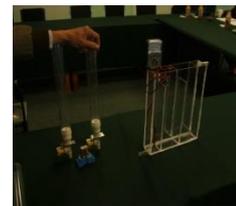
Ozonador y aireador



Rayos U.V.



Controlador de pH



Con las concentraciones en el efluente es posible reutilizar el efluente en:

- A) Industria.
- B) Recarga de acuíferos.
- C) Generación de energía eléctrica.
- D) Lagos en Parques públicos.

Acknowledgements. EATS thanks CONACyT, Mexico for the scholarship and Dr. en Ing. Carlos Solís Morelos by all the knowledge you gave me and letting me do this project as a bench-plant wastewater treatment to purify.

12. Bibliografía

1. C. Solís., 2010. “*Informe Técnico Final. Procesos físico-químicos avanzados*”, Clarificación de Aguas Superficiales Crudas.
2. C. Solís M., 2002. Tratamiento ARM: Reactor UASB-Laguna-Filtro Anaerobio.
3. Cliford-White, 1999. California Wastewater Reclamation Criteria, title 22. Division 4. Chapter 3.
4. CNA., 2009. “Atlas del Agua en México”. Ed. CNH.
5. Hillel I. Shuval., 1985. ”Public Health Implications of Wastewater Reuse for Municipal Purposes”, “Wastewater Renovation and Reuse”. Ed. D’ITRI, F.
6. Frank L. Slejko., 1985. “Adsorption Technology”. Copiright by Marcel Dekker.
7. John Wiley & sons, 1999. “Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants.
8. Mariel Dekker., 1985. “Adsorption Technology”. Edit. Frank L. Slejko.
9. Manual of practice FD13, 1996. “Aireation”, Water Environmental Federation”. American Society of Civil Engineers No. 8 (ASCE).
10. Metcalf and Eddy., 1991. “Wastewater Engineering Treatment-Disposal-Reuse”, Mc Graw Hill.
11. 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”, Norma Oficial Mexicana. pp 2-5.
12. NOM-014-CONAGUA-2007. “Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada”, Norma Oficial Mexicana.
13. Oron, G., Bicz, A., Gillerman, L., 2002. *Trends and opportunities for small-scale wastewater treatment and reclamation plants in the eastern Mediterranean basin*. Libro de ponencias principales del congreso internacional de tecnologías de pequeña escala para la depuración y

gestión de aguas residuales en el ámbito Mediterráneo. Sevilla, España, 113-130 .

14. T. Harif*, A. Adin., 2007. "Characteristics of aggregates formed by electroflocculation of a colloidal suspension". *Water Research*, 41, 2951–2961.
15. Thompson, G., Forster, C., 2003. Bulking in Activated Sludge Plants Treating Paper Mill Wastewaters. *Water Research*, 37, 2636–2644.
16. WAF Manual of Practice FD-13-1996.

CAPÍTULO 6
DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE LOS VALORES Y LAS
FIGURAS DE LOS PARÁMETROS SELECCIONADOS.

Turbiedad

Los resultados que obtuvimos en la turbiedad está en el rango de 0.112 (11.2%) a 0.826 (82.6%) considerando como baja y alta respectivamente.

Los valores mostraron un comportamiento descendente hasta la columna C.A.1; en la columna C.A.2, se tiene un ascenso de 1.13L a 1.35; siguiendo un descenso hasta el proceso de rayos UV, con valor de 0.300 y en el último proceso, cloración se elevó a 0.319. El comportamiento de los valores se pueden observar en la tabla 8.

Tabla 8. Valores medios tomados del cuadro 1 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimenta- dor | F.A. | C.A. 1 | C.A. 2 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|----------------------|---------------------------|--------------|---------------|---------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|
| Med=4.63 | 1.644 | 1.28 | 1.13 | 1.35 | 0.616 | 0.345 | 0.300 | 0.379 |
| $\delta_{n-1}= 1.44$ | 0.972 | 1.033 | 0.734 | 0.151 | 0.233 | 0.202 | 0.170 | 0.150 |
| CV=0.312 | 0.591 | 6.826 | 0.650 | 0.112 | 0.386 | 0.585 | 0.561 | 0.398 |

La turbiedad se relaciona con la concentración de materia suspendida esto es, se debe tener un incremento, en los procesos de rayos UV y en el de cloración; lo cual puede ser porque en los análisis se tenga errores humanos o bien, que debido al tiempo en el cual el sistema no funcionaba (sábados y domingos) se tuviese una generación de materia suspendida, esto se debe detectar también en los valores del parámetro de sólidos suspendidos totales y en el de sólidos suspendidos volátiles. Lo cual se ve reflejado en la figura 5.

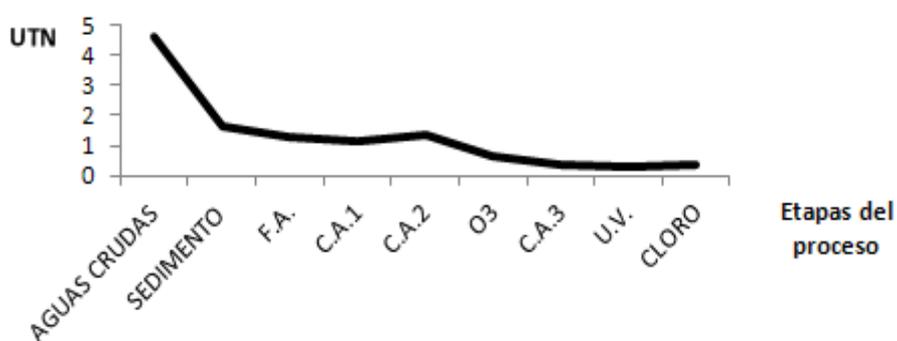


Figura 5. Turbiedad en cada etapa del sistema.

Color unidad Pt-Co

El color se debe a la materia en solución, según este origen, se tiene una remoción descendente en cada proceso. Así como se puede observar en la tabla 9.

Tabla 9. Valores medios tomados del cuadro 2 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A.1 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|-----------------------|---------------------|-------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=90.54 | 48.45 | 44.5 | 12.9 | 7.0 | 1.70 | 1.56 | 1.11 |
| $\delta_{n-1}= 22.41$ | 18.61 | 16.76 | 11.27 | 5.19 | 1.64 | 3.17 | 1.83 |
| CV=0.25 | 0.384 | 0.38 | 0.87 | 0.73 | 0.96 | 2.00 | 1.65 |

El coeficiente de variabilidad está en el rango de 0.25 (25%) a (200%) éste es de un valor muy alto. El valor de 200% se obtuvo en el proceso de UV, esta variabilidad se debe a que el rango de valores es de 0 a 8; predominio de los valores 0.

El tener alta la variabilidad no es indicativo de que tenga una realidad este valor; se debe interpretar, mejor como el tener varios valores en cero y unos pocos con valores de 8 y 6; que incide en la δ_{n-1} , se ve que la diferencia del valor medio con respecto a los valores en cero, se deberá atender la ubicación de las columnas de C.A. Esto se puede apreciar en la figura 6.

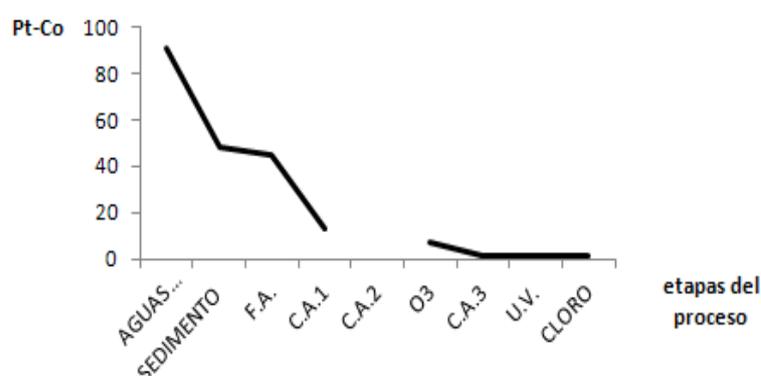


Figura 6. Colorimetría en cada etapa del sistema.

La eficiencia global es de 98.8%, que se considera excelente. Los valores de los cuatro últimos procesos están por debajo de los fijados por la NOM-127-SSA1-1994, que es de 20 unidades Pt-Co. El efluente de la planta semipiloto tiene un valor de 1.11 que es menor del permisible.

DQO

Los valores de las concentraciones, disminuyen en cada proceso con excepción de la cloración que se incremento de 5.93 (penúltimo proceso) a 8.24 mg/l en la cloración (último proceso). Es posible por la concentración residual baja del cloro, ya que debe tener una dosis que oxide a las cloraminas y amonias, lo cual coincide en la remoción de materia orgánica medida como DQO. El coeficiente de variabilidad está en el rango de 15.4% a 94.3%, se interpreta como bajo a alto. No está considerada en la norma seleccionada para evaluar el comportamiento de la planta semipiloto, pero se obtuvieron los siguientes datos en mg/l de la tabla 10, donde se observa que es alto, debido a la alta concentración del influente.

Tabla 10. Valores medios de DQO, tomados del cuadro 3 del apéndice A.

| Agua cruda | Sedimentador | F.A. | C.A. 1 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|-----------------------|---------------------|-------------|---------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=54.42 | 41.98 | 38.5 | 13.30 | 13.02 | 7.14 | 5.93 | 8.24 |
| $\delta_{n-1}= 10.85$ | 6.87 | 5.94 | 5.74 | 5.51 | 5.23 | 5.59 | 6.19 |
| CV= 19.95 | 16.4% | 15.4% | 43.6 | 42.4 | 82% | 94.3% | 75% |

La presencia de las bajas concentraciones, muestran que si tienen materia orgánica, la cual no fue removida, es factible que incrementando la dosis de cloro, el tiempo de detención en el ozonador, sea posible removerla en su totalidad, el valor mínimo obtenido que de 5.93mg/l, en los UV incrementándose con la cloración a una concentración de 8.24mg/l, esto se puede observar en la figura 7.

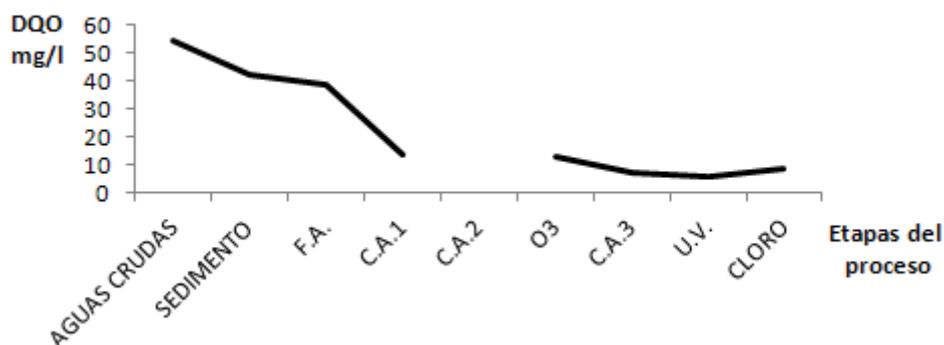


Figura 7. DQO en cada etapa del sistema.

Se debe tener presente en la segunda etapa o fase de la investigación para considera otros procesos que la abatan en su totalidad. En el sistema semipiloto se tuvo una eficiencia global en remoción del 80.4%, que se considera como adecuada.

Sulfatos mg/l

| | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| Med=7.46 | 7.90 | 7.89 | 7.87 | 7.81 | 8.34 | 8.30 | 8.22 | 8.03 |
| $\delta_{n-1}= 0.224$ | 0.207 | 0.205 | 0.23 | | 0.127 | 0.221 | 0.24 | 0.25 |
| CV= 0.031 | 0.026 | 0.026 | 0.079 | | 0.015 | 0.027 | 0.029 | 0.031 |

Tabla 12. Valores medios de pH (unidades de pH), tomados del cuadro 5 del apéndice A.

El coeficiente de variabilidad resultó pequeño con valores de 0.015 (1.5%) a 0.031 (3.1%), el cual indica que los datos considerados conservan una uniformidad sin variaciones notables.

Con respecto a los valores recomendados por la normatividad se encuentran dentro del rango permisible. No se obtuvieron valores debajo de 7.0, y se pueden ver en la figura 9.

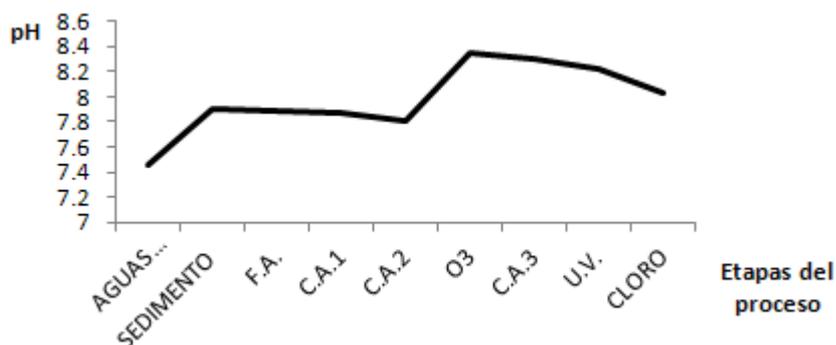


Figura 9. pH (unidades de pH) de cada etapa del sistema.

NH₃-N en mg/L

Los valores del NH₃-N presentan una situación errática; no se tiene una conducta, que permita tomar una idea de la que ocurre en el sistema. Se tiene una conducta, que permita tomar una idea de la que ocurre en el sistema. Se tienen valores pico en la columna C.A.1 con una concentración de 3.445; el otro valor pico se detecta en el proceso de cloración, con un valor 5.51, los valores bajos se localizan en el sedimentador y filtro rápido de arena de 1.85 mg/L. Otra concentración mínima se localizó en el proceso de ozonación (4to. Proceso) con una concentración de 1.821 mg/L, lo cual se puede ver en la tabla 13.

Tabla 13. Valores medios del NH₃-N (mg/l), tomados del cuadro 6 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A.1 | O ₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|--------------|--------------|------|-------|----------------|-------|------|-------|
|--------------|--------------|------|-------|----------------|-------|------|-------|

| | | | | | | | |
|----------------------|------|------|-------|-------|--------|-------|-------|
| Med=2.28 | 1.85 | 1.85 | 3.445 | 1.821 | 2.30 | 3.93 | 5.51 |
| $\delta_{n-1}= 2.84$ | 2.43 | 2.98 | 3.84 | 2.381 | 2.68 | 3.24 | 4.47 |
| CV= 125% | 131% | 161% | 112% | 130% | 116.5% | 82.4% | 81.2% |

En este proceso se tienen incrementos en los tres últimos procesos con concentraciones de 2.30 mg/L; 3.93mg/L y 5.51mg/L (Columna C.A.3, UV y cloración, respectivamente), esto indica que los procesos en lugar de un abastecimiento, sucedió lo contrario, y se puede observar en la figura 10.

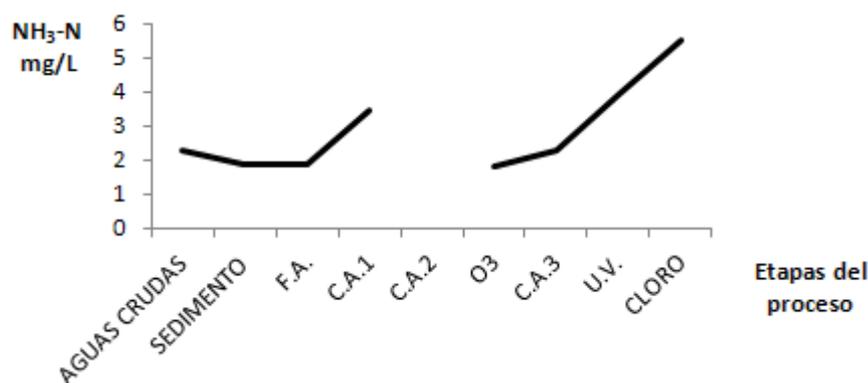


Figura 10. NH₃-N en mg/L de cada etapa del sistema.

NO₂-N en mg/L

Los valores de la concentración de NO₂-N, tienen un comportamiento errático, después de un descenso en la concentración hasta el filtro de arena (proceso 2) le siguen los picos con concentraciones de 0.906 y 1.92 mg/L correspondientes a los procesos de la columna C.A.1 y ozonador respectivamente para después descender a una concentración de 1.74 mg/L, en el proceso de cloración (efluente del sistema). Se pueden ver estos valores en la tabla 14.

Tabla 14. Valores medios **NO₂-N en mg/L**, tomados del cuadro 7 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A.1 | C.A.2 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|-----------------------|---------------------|-------------|--------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=0.834 | 0.776 | 0.737 | 0.909 | | 1.92 | 1.80 | 1.76 | 1.74 |
| $\delta_{n-1} = 0.75$ | 0.701 | 0.71 | 0.722 | | 0.238 | 0.80 | 1.029 | 0.79 |
| CV= 90% | 91% | 96% | 79.7% | | 124% | 45% | 58.9% | 45% |

La concentración presenta una situación errática; no se tiene máxima permisible por la NOM-127-SSA1, ya que es de 1.0 mg/L, sin embargo en los cuatro últimos procesos, la concentración es superior a la norma, lo cual se puede ver la tendencia por medio de la figura 11.

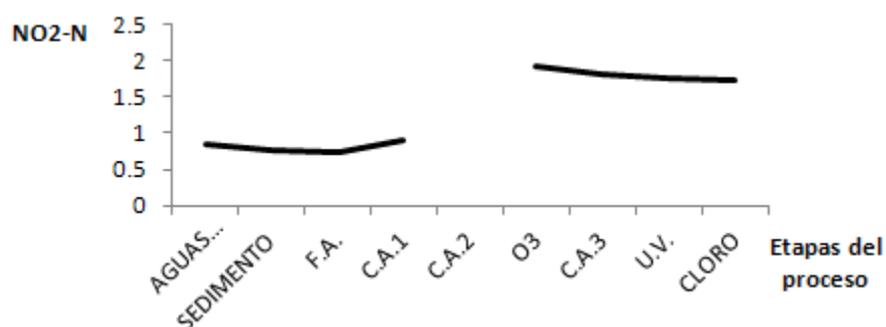


Figura 11. NO₂-N en mg/L de cada etapa del sistema.

Conjuntamente con el parámetro NH₃-N se detectan puntos críticos en el inicio del incremento de la concentración de estos dos parámetros. Analizando ambos cuadros, el sitio indicado para remover NH₃-N, es antes del filtro de arena, o antes de la columna de C.A. 1, ya que después de estos procesos tienen lugar los incrementos de las concentraciones.

Es posible que incrementando la remoción por micro burbujas y la adición de cloro entre al rango recomendado.

NO₃-N en mg/L

Los valores de las concentraciones tienen un comportamiento errático, ya que, de un valor inicial de 5.6 mg/L desciende a 2.74 mg/L a la columna de C.A.1, donde inicia un incremento hasta el proceso de cloración con una concentración de 6.65mg/L, lo cual se puede ver en la tabla 14

Tabla 14. Valores medios de **NO₃-N (mg/L)**, tomados del cuadro 8 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A.1 | O ₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|----------------------|--------------|-------|-------|----------------|-------|------|-------|
| Med=5.6 | 5.51 | 4.21 | 2.74 | 3.48 | 4.56 | 5.14 | 6.65 |
| $\delta_{n-1}= 3.43$ | 4.10 | 2.72 | 2.16 | 1.61 | 1.63 | 1.47 | 0.97 |
| CV= 61.2 % | 75% | 64.7% | 18.7% | 46.5% | 35.7% | 28% | 14.6% |

En la figura 12 se puede ver el comportamiento de la concentración del NO₃-N, la tendencia que tiene en cada etapa del proceso.

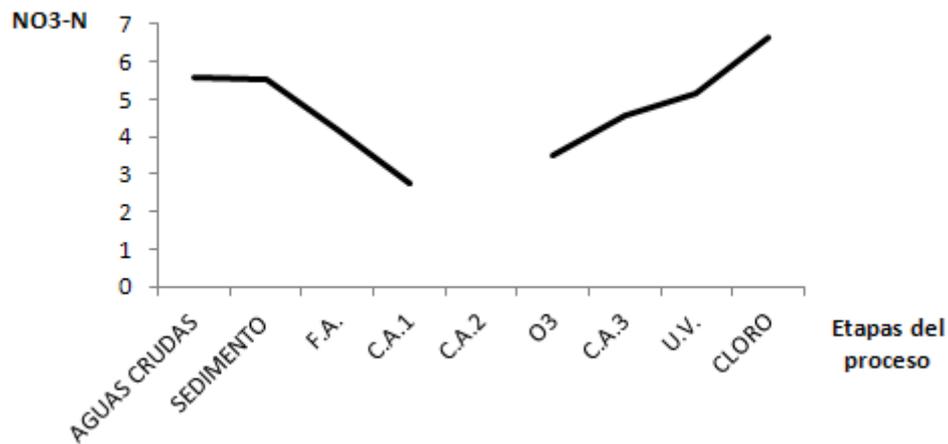


Figura 12. NO₃-N en mg/L, de cada etapa del sistema.

Los coeficientes de variabilidad están en el rango de 14.6% a 78.7%, esto es de porcentajes pequeños a valores grandes en general muestran que el comportamiento es extraño.

No es fácil obtener una conclusión acerca de esta variación. Posiblemente removiendo NO₄ se logre bajar la concentración.

Ya se ha agregado los nuevos procesos de microburbujas y primero un accesorio que elevará el pH a valores de 11-12 y después de la aireación otro accesorio lo bajará a un valor de 7-7.5

El valor máximo permisible por la normatividad es de 10mg/L los valores del cuadro resumen se encuentran por este valor.

Sólidos totales en mg/L

También se presentan valores descendentes hasta el proceso de C.A.1 y después de esto, los valores ascienden hasta la cloración (efluente del sistema), este comportamiento se puede ver en la tabla 15.

Tabla 15. Valores medios de **Sólidos totales (mg/L)**, tomados del cuadro 9 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A.1 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|----------------------|---------------------|-------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=55.3 | 541.1 | 543.3 | 518.2 | 518 | 497.1 | 502.8 | 506.36 |
| $\delta_{n-1}= 37.6$ | 32.1 | 38.1 | 40.81 | 26.68 | 40.48 | 40.84 | 40.64 |
| CV= 7.0 % | 6.0% | 7.0% | 7.5% | 5.1% | 8.1% | 8.1% | 8.0% |

Los coeficientes de variabilidad son bajos, indicadores de la uniformidad de los valores de sólidos totales, los cuales se pueden apreciar en la figura 12.

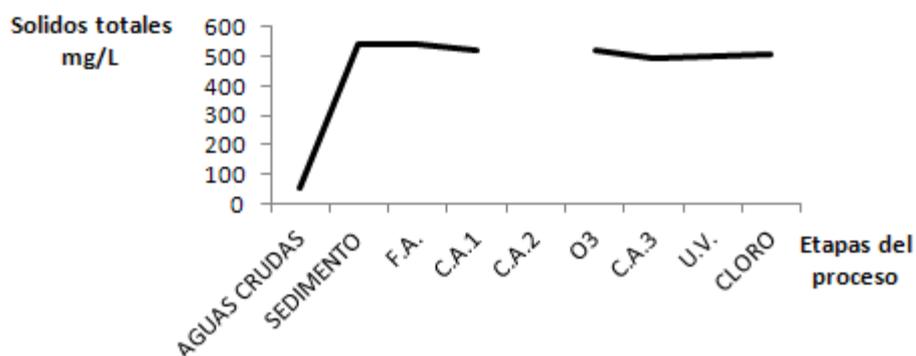


Figura 12. **NO₃-N** en mg/L, de cada etapa del sistema.

Los valores anotados cumplen con la concentración máxima permisible de la normatividad, siendo que recomienda una concentración máxima de 1000mg/L.

Sólidos totales volátiles en mg/L

En el sistema se remueve un 30% de los sólidos totales volátiles, la concentración en el influente (aguas crudas) es de 126.5 mg/L y la del efluente es de 88.0 mg/L, así como se puede observar en la tabla 16.

Tabla 16. Valores medios **Sólidos totales volátiles (mg/L)**, tomados del cuadro 10 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A. 1 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|-----------------------|---------------------|-------------|---------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=126.5 | 114.18 | 111.64 | 109.1 | 95.55 | 88.40 | 94 | 88 |
| $\delta_{n-1}= 12.04$ | 21.49 | 15.33 | 19.57 | 14.11 | 22.16 | 17.9 | 17.8 |
| CV= 9.5 % | 18.8% | 13.7% | 18.1 | 14.3% | 25% | 19.1% | 20.2% |

La materia volátil está constituida principalmente por material orgánica y un pequeño porcentaje de ácidos y gases susceptibles de ser removidos 100°C.

Los coeficientes de variabilidad son pequeños, lo que confirma la buena relación entre los diferentes procesos, lo cual se puede apreciar en la fig. 13.

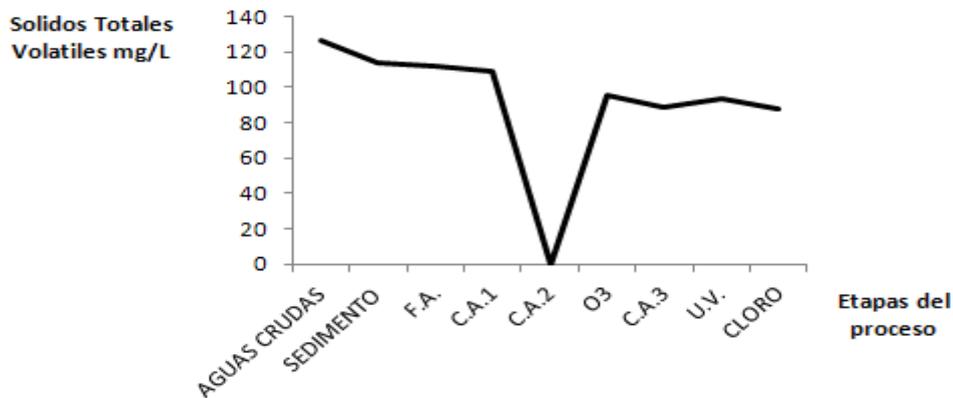


Figura 13. Sólidos totales volátiles (mg/L), de cada etapa del sistema.

La eficiencia global en remoción de Sólidos totales es de 30.5% que no es mala considerando lo complejo de la materia subproducto, de los diferentes procesos.

La concentración de 88 mg/L se puede disminuir en los procesos de adsorción aireación microburbujas y en los procesos de oxidación avanzada, se deberá tener especial atención a estos procesos, incrementando el tiempo de contacto.

Sólidos fijos totales en mg/L

Se tienen puntos picos entre los procesos, como en el filtro de arena, la ozonación y en la cloración que es el proceso final del tren, esto se ve reflejado en la tabla 17.

Tabla 17 Valores medios **Sólidos fijos totales mg/L** tomados del cuadro 11 del apéndice A

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A. 1 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|----------------------|---------------------|-------------|---------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=425.4 | 426.9 | 431.6 | 408.4 | 420 | 415.3 | 408.5 | 417.8 |
| $\delta_{n-1}= 34.5$ | 26.8 | 31.7 | 30.3 | 26 | 30.7 | 38.7 | 28.8 |
| CV= 8.2 % | 6.2% | 7.3% | 7.4% | 6.2% | 7.4% | 9.5% | 6.9% |

Se debe tener atención a estos valores picos, posiblemente se deba a que los sábados y domingos, no se operaba, es decir se suspendía la alimentación al sistema; lo que hace pensar que la materia orgánica retenida en los medios filtrantes provocaba la disminución de la materia lentamente biodegradable incrementando las variaciones en los valores de un proceso a otro, que en lugar de tener un abatimiento, estas variaciones se pueden analizar por medio de la figura 13.

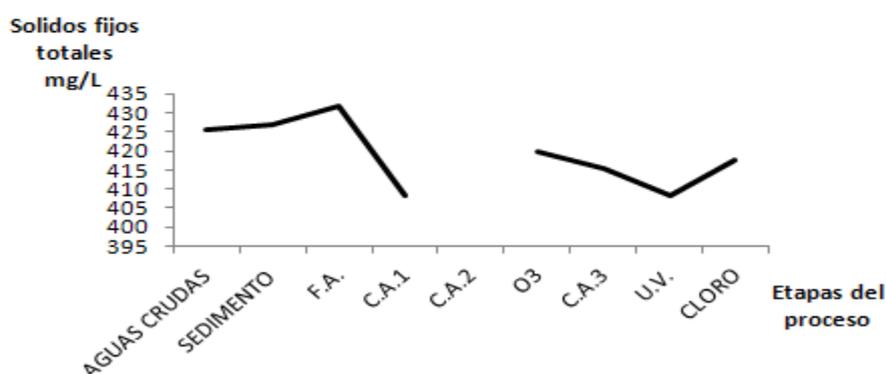


Figura 14. **Sólidos totales volátiles (mg/L), de cada etapa del sistema.**

Los coeficientes de variabilidad son pequeños indicadores de la buena relación de los valores obtenidos en los diferentes procesos del sistema.

La eficiencia global en remoción no es relevante se tiene un porcentaje del 1.8% en remoción de sólidos totales fijos.

Sólidos Suspendidos Totales en mg/L

La concentración sigue un modelo descendente de proceso a proceso. Aunque la normatividad no contempla este parámetro el valor de la concentración en el efluente se considera aceptable, con valor de 1.24mg/L. La eficiencia global en

remoción de sólidos suspendidos totales es de 82.2%, lo cual se expresa en la tabla 18.

Tabla 18. Valores medios **Sólidos Suspendidos Totales mg/L** tomados del cuadro 12 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A.1 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|----------------------|---------------------|-------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=7.4 | 7.45 | 4.78 | 4.18 | 2 | 0.727 | 1.27 | 1.24 |
| $\delta_{n-1}= 6.18$ | 607 | 5.09 | 2.68 | 2.14 | 0.618 | 1.85 | 142 |
| CV= 84 % | 82% | 106.5% | 64% | 107% | 222% | 145.6% | 118% |

Los coeficientes de variabilidad, aunque son altos no manifiesta una variación entre los datos obtenidos más bien se debe a que conforme se incrementan por los valores cero; la variabilidad se incrementa por este motivo. Se observa que en los últimos procesos, con mayoría de valores cero el coeficiente de variabilidad se incrementa, cuando en realidad se debe tener una buena relación entre los valores que conforman el cuadro 12 del apéndice A y que se puede visualizar en la figura 15.

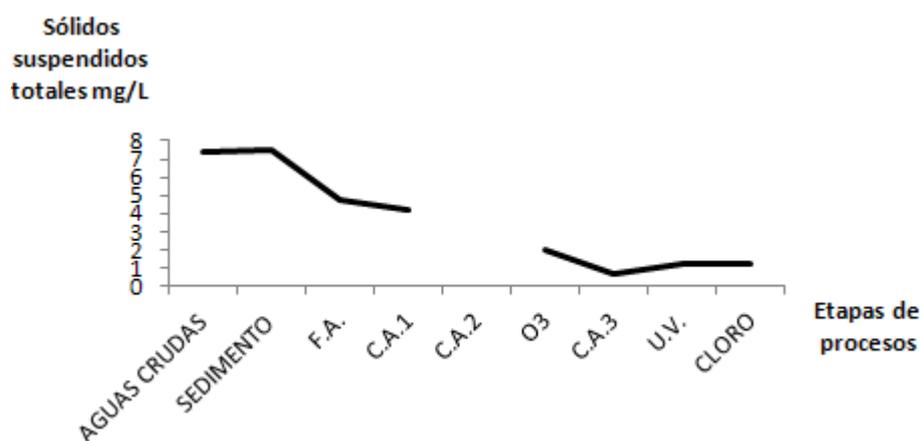


Figura 15. Sólidos Suspendidos Totales (mg/L), de cada etapa del sistema.

Sólidos Suspendidos Fijos en mg/L

El comportamiento parece errático, como las concentraciones son pequeñas se tienen varias concentraciones cero y se refleja en la figura 16, esto hace que las

medias presentan variaciones de proceso a proceso, dichas variaciones se pueden observar en la tabla 19.

Tabla 19. Valores medios **Sólidos Suspendidos Fijos mg/L** tomados del cuadro 13 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A.1 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|----------------------|---------------------|-------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=0.909 | 2 | 2.56 | 0.909 | 1.45 | 0.453 | 0.818 | 0.636 |
| $\delta_{n-1}= 2.07$ | 2.98 | 4.39 | 1.446 | 1.86 | 1.213 | 1.47 | 0.924 |
| CV= 228 % | 149% | 171.5% | 159% | 129% | 267% | 179.8% | 145.8% |

La eficiencia global de remoción es de 30%, y la concentración en el efluente es de 0.636 mg/L, el cual se puede ver en la figura 16.

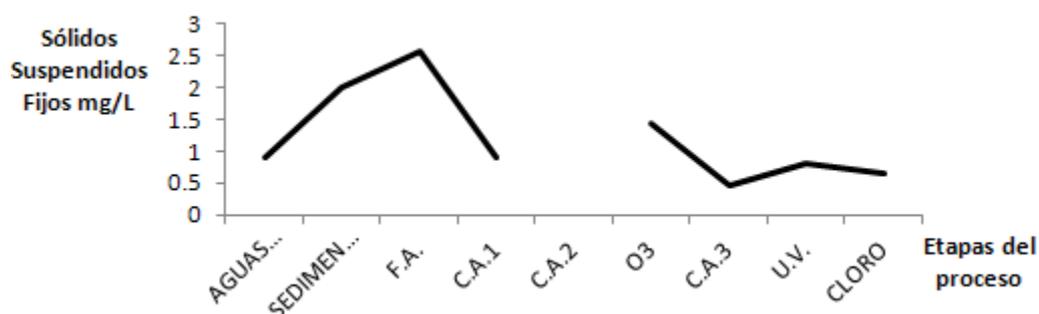


Figura 16. **Sólidos Suspendidos Fijos (mg/L)** de cada etapa del sistema.

Sólidos Suspendidos Volátiles mg/L

Los valores de las concentraciones presentan un comportamiento errático; el origen de ello se debe a que la planta semipiloto, no fue operada de forma continua, los sábados y domingos no se operó por lo que es de esperarse que durante este lapso tuvieron lugar reacciones bioquímicas de la materia retenida en los medios filtrantes. Estos valores se presentan en la tabla 20.

Tabla 20. Valores medios **Sólidos Suspendidos Volátiles mg/L** tomados del cuadro 14 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A.1 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|----------------------|---------------------|-------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=6.91 | 4.73 | 2.80 | 3 | 0.545 | 0.242 | 0.545 | 0.636 |
| $\delta_{n-1}= 8.07$ | 3.93 | 3.64 | 2.98 | 0.934 | 0.90 | 1.507 | 1.286 |
| CV= 117 % | 50.8% | 130% | 99% | 171% | 372% | 277% | 202% |

La remoción global es de 91% , indica el buen funcionamiento del sistema, como remover lo del parámetro sólidos suspendidos volátiles, por lo que se puede ver en la figura 17.

Los coeficientes de variabilidad resultaron altos debido a lo anotado en las páginas anteriores.

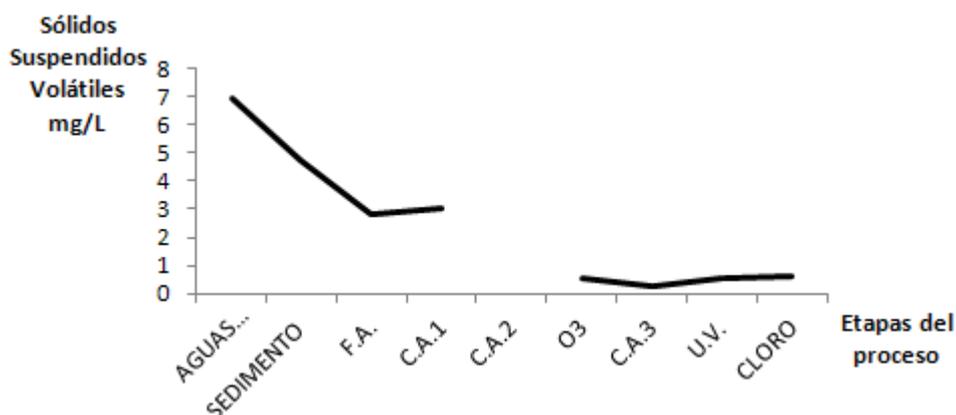


Figura 17. **Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/L)** de cada etapa del sistema.

Sólidos Disueltos Totales mg/L

Los valores de las concentraciones de sólidos disueltos sigue una concentración errática, se presentan picos después de valores bajos, en los dos últimos procesos la concentración se eleva, ver tabla 21

Tabla 21. Valores medios **Sólidos Disueltos Totales mg/L** tomados del cuadro 15 del apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A.1 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|----------------------|---------------------|-------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=546.7 | 533.7 | 529.55 | 514 | 516 | 496.4 | 501.4 | 504.73 |
| $\delta_{n-1}= 37.4$ | 29.09 | 30.23 | 39.49 | 77.17 | 41.04 | 40.5 | 41.14 |
| CV= 6.8 % | 5.4% | 5.7% | 7.7% | 5.3% | 8.3% | 8.1% | 8.2% |

La eficiencia global en remoción de sólidos disueltos es de 7.7%, porcentaje bajo a pesar de tener varios procesos que deberían proporcionar una eficiencia adecuada.

Los coeficientes de variabilidad son bajos, lo que permite aseverar que los valores del cuadro 15 del apéndice tienen una relación adecuada, manifiestan que entre ellos se tienen una buena uniformidad, ver la figura 18.

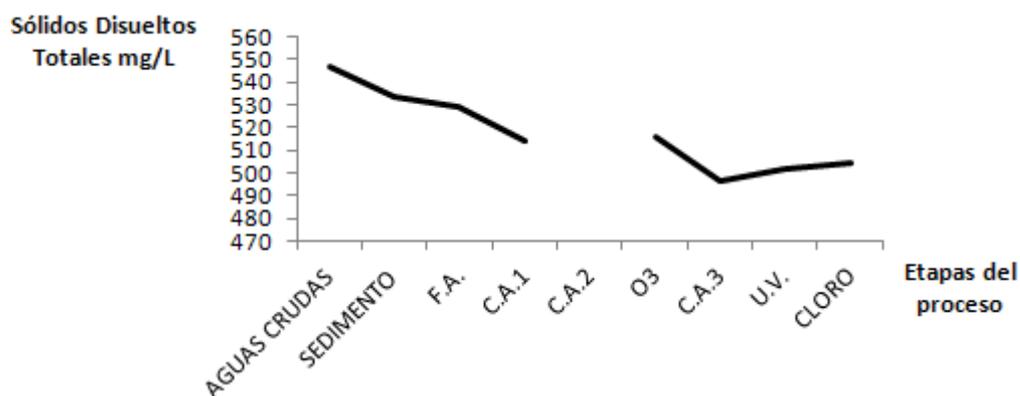


Figura 18. Sólidos Disueltos Totales mg/L de cada etapa del sistema.

Coliformes totales NMP/100ml

Los valores de este parámetro se encuentran en el cuadro 16 del apéndice A, en el cual, no se determinaron las medias, desviación estándar y coeficientes de variabilidad, ya que el mayor número de datos tienen un valor de <3, lo cual no ha sido explicado por el laboratorio, ya que los valores 2.1 0 son menos de 3, este parámetro deberá ser verificado o justificado.

En este caso se ha considerado como cero. Por lo que la eficiencia del sistema es de 100%.

DBO en mg/l

Los valores de este parámetro se encuentran en el cuadro 17 del apéndice A, de los cuales destacan los siguientes puntos:

- a) Aguas crudas se dispone de un dato con un valor de 8mg/l.
- b) En el sedimentador se tienen con un valor de la concentración de <3, como en los casos anteriores los valores de 2, 1, 0 son menores a <3, la interpretación será solicitado al laboratorio.
- c) Filtro de arena sin datos.
- d) Columna de C.A. 1, con un solo dato con valor de 8mg/l, igual que el caso que el de aguas crudas.
- e) Columna C.A. 2, sin datos.
- f) Ozono con los valores de <3 mg/l, misma interpretación que el punto b.
- g) Columna C.A. 3, sin datos.
- h) UV, con un solo dato con valor <3 mg/l, mismo caso que el punto b.
- i) Cloración en el cual se tiene una media de 6.0mg/l, cuatro valores, en desviación estándar de 5.29 y un coeficiente de variabilidad de 88%, que es alta, los cuatro valores ahí consignados no tienen una buena relación por lo que se considera como valores dudosos.

Coliformes Totales Colis/100mg/l.

Análisis realizados por el laboratorio Certificado de la Facultad de Química. El cuadro 19 del apéndice A dispone de algunos valores de un laboratorio certificado.

Para comprobar el sistema de coliformes totales se mandó la muestra al laboratorio certificado de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México. Los valores se disparan sobre una concentración de coliformes en el proceso de loración con una concentración media de 11.3 colis/100ml, cn una desviación estándar de 23.1 colis/100ml y coeficiente de variabilidad de 142%, valores que no coinciden con las concentraciones en los procesos antecedentes en que los valores están en el rango de

<1.1 a <3, en la segunda etapa se deberá prestar especial atención, pues las concentraciones del cuadro 19, no tienen una relación razonable.

Cloro residual mg/L.

En los diferentes procesos de la planta semipiloto, del cuadro 20 del apéndice A, se han elegido los valores de las medias, desviaciones estándar y coeficientes de variabilidad, los cuales se presentan en la tabla 22.

Del proceso aguas crudas hasta el de UV, se tiene un abatimiento razonable, el cloro inicial se debe al adicionado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales Toluca Norte. En el proceso de cloración de la planta semipiloto se debe adicionar el cloro.

Tabla 22. Valores medios **cloro residual mg/L** cuadro 20 el apéndice A.

| Aguas crudas | Sedimentador | F.A. | C.A.1 | C.A.2 | O₃ | C.A.3 | U.V. | Cloro |
|-----------------------|---------------------|-------------|--------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Med=0.123 | 0.045 | 0.090 | 0.012 | 0.005 | 0.0415 | 0.005 | 0.0025 | 1.03 |
| $\delta_{n-1}= 0.019$ | 0.026 | 0.046 | 0.012 | 0.01 | 0.064 | 0.064 | 0.61 | 0.364 |
| CV= 15.3% | 58.8% | 52.1% | 100% | 200% | 135% | 135% | 200% | 35.3% |

El cloro residual con un valor de 1.03 mg/L, no es lo suficiente para eliminar NH₃-N, NO₃, ver figura 19.

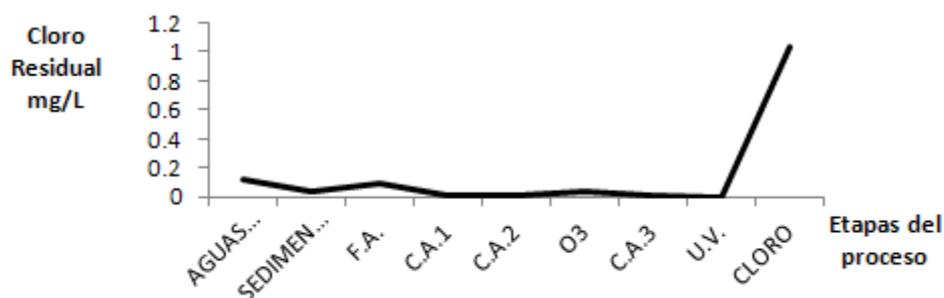


Figura 19 Cloro residual mg/L de cada etapa del sistema.

CAPÍTULO 7
CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

CONCLUSIONES

En esta investigación se concluye que es posible potabilizar el agua residual municipal de la Planta Toluca Norte cumpliendo con la NOM-127-SSA1-1994. A continuación se muestran los valores de los parámetros.

| Parámetro | Influyente planta semipiloto (efluente de la P. N. Toluca). | Efluente planta semipiloto | Concentración máxima permisible NOM-127-SSA1-1994 | η % |
|--------------------|---|----------------------------|---|-------|
| Color | <2.5 | <2.5 | 26 | 0 |
| Turbiedad | <2.5 | <2.5 | 5 | 0 |
| Cloro residual | 0.025 | <0.20 | 2.5 | - |
| Nitratos IV | 6.0 | 4.3 | 10.0 | 28 |
| Nitritos IV | 0.080 | 0.58 | 1.0 | -71* |
| Amonia IV | 0.31 | 29.1 | 0.5 | -93* |
| SNT | 510 | 484.6 | 1000 | 5 |
| pH insitu | 7.5 | 7.52 | 6.5-8.5 | - |
| Detergentes SAA14 | <0.1 | 0.124 | 0.50 | -140* |
| Aluminio | <0.1 | <0.001 | 20.0 | - |
| Arsénico | <0.0016 | <0.001 | 0.0025 | - |
| Bario | <0.002 | <0.3 | 0.70 | - |
| Cadmio | <0.002 | <0.1 | 0.005 | - |
| Cianuros | <0.02 | <0.02 | 0.07 | - |
| Cloruros | 33.46 | 84.37 | 250 | -60 |
| Cobre | <0.01 | <0.01 | 2.0 | - |
| Cromo Total | <0.006 | <0.1 | 0.05 | - |
| Dureza Total | 199.9 | 133.12 | 500 | 33 |
| Fenoles | <0.001 | <0.001 | 0.30 | - |
| Hierro | <0.1 | <0.1 | 0.30 | - |
| Fluoruros | <0.1 | <0.315 | 1.50 | -68 |
| Manganeso | <0.1 | <0.10 | 0.15 | - |
| Mercurio | <0.005 | <0.001 | 0.001 | - |
| Zinc | <0.1 | <0.116 | 5.00 | - |
| Plomo | <0.001 | <0.01 | 0.01 | - |
| Sodio | 50.0 | 130 | 200 | -61 |
| Sulfatos | 72.8 | 67.7 | 400 | 5 |
| DBO | 8.0 | <0.5 | N.A. | 100 |
| DQO | 38.0 | - | - | - |
| Coliformes totales | 43 | <1.1 | N.A. | 100 |
| Coliformes fecales | 43 | <1.1 | N.A. | 100 |

De acuerdo a la tabla anterior se tienen los siguientes comentarios:

- 1 Las concentraciones obtenidas cumplen con la normatividad.
- 2 El valor de Amonia-N está arriba de las concentraciones máximas permisibles.

- 3 Por lo tanto se adicionaron al tren de tratamiento, los siguientes complementos: un aireador y ozonador (ambos con microburbujas), así como rayos U.V., para remover el Amonia-N, los cuales se pueden observar a continuación:

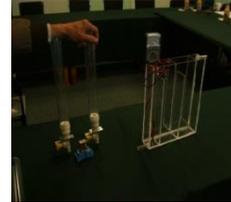
Ozonador y aireador



Rayos U.V.



Controlador de pH



- 4 Con las concentraciones en el efluente es posible reutilizar el efluente en:
- E) Industria.
 - F) Recarga de acuíferos.
 - G) Generación de energía eléctrica.
 - H) Lagos en Parques públicos.

SUGERENCIAS

Debido a que el Amonia-N de 0.31 subió a 29.1ppm, por lo que este valor está arriba de las concentraciones máximas permisibles, se sugiere los siguientes puntos:

Remover el nitrógeno amoniacal por arrastre de aire a un pH de 10.5 a 11 y con ozono a pH alto.

En la fase II se deberá prestar atención a las columnas de C.A., incrementando el tiempo de contacto para remover parte de la materia soluble y evitar los picos en los dos últimos procesos.

Más tiempo de contacto en el ozonador.

Esta anomalía será base para considerar los procesos de aireación con microburbujas a pH en el rango de 10.5-11

La concentración de cloro no fue lo suficiente para oxidar al $\text{NH}_3\text{-N}$; como lo indican las recomendaciones de diseño, por lo que se recomienda incrementar la dosis de cloro para obtener un residual libre de 1.50mg/L (Norma 127-SSA-1), para que tenga lugar la remoción de $\text{NH}_3\text{-N}$. Esto implica aumentar la dosis, para oxidar conjuntamente con el microburbujeo la concentración de $\text{NH}_3\text{-N}$ a valores

debajo de 0.5mg/L que es la concentración máxima permisible por la norma de referencia.

Se deberá prestar atención a la dosis de ozono y del peróxido, es importante contemplar que el ozono debe de estar antes o después del aireador, debido a su función de remover el amonia-N a pH altos.

En el proceso de coagulación-floculación para que se mejore la remoción de N en sus diferentes formas.

También se sugiere que la planta semipiloto obtenga la automatización para mayor control, tanto del pH, como en cada etapa del tren de tratamiento.

Referencias

Angelakis, A., Marecos Do Monte, M. H. F., Bontoux, L., Asano, T. The status of wastewater reuse practice in the Mediterranean basin: need for guidelines. *Wat. Res.*, 33, 10, 2201-2217 (1999).

APHA, AWWA, WPCF. *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Ed. Díaz de Santos, Madrid, España (1992).

Carlos Solís Morelos, 2006. Corridas experimentales en un sedimentador con Manto de Lodos, flujo ascendente. Determinación de la Eficiencia en el Reactor. Reporte Técnico final.

CEPIS. Ciclo: tratamiento, Serie: Filtración Rápida 1992.

CEPIS. Manual I.- El Agua-Calidad y tratamiento para Consumo Humano; Manual II.- Criterios de Selección 1992.

CEPIS. Manual I.- Teoría y Diseño; Manual II.- Diseño; Manual III.- Operación y Mantenimiento 1992.

CEPIS. Serie Filtración Rápida. Manual III.- Teoría 1992.

Changha Lee, Carsten Schmidt, Jeyong Yoon, and Urs von Gunten, *Journal environmental and technology Environ. Sci. Technol.*, 2007, 41 (6), pp 2056–2063.

Copyright © 2007 American Chemical Society.

CONAGUA. Subdirección General de Programación. Elaborado a partir de datos de la Subdirección General técnica. Mexico. 2006.

http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Estadisticas/Central/Estadisticas_Agua_2007/07_Capitulo%207.pdf

“Control de Calidad y Tratamiento del Agua”. American Water Works Association. (1975).

Corina Schmelkes. 1998, "Anteproyecto e Informe Final", Manual para la presentación de anteproyectos informes de investigación (tesis), Mexico: Oxford University Press. pp 1–178.

D' Itri, Frank. "Wasterwater Renovation and Reuse". Mariel Dekkev mc.1977.

David G. Stevenson. "Water Treatment Unit Processes". Imperial college Ppress 1999.

Derinorhon, Emime ubay cokgorCod Fractionation in wastewater characterization-the state of the art. "Environmental Engineering Department Istcun bul technical university. May 1996.

Eikelboom, D. H. Filamentous organisms observed in activated sludge. Wat. Res., 9, 365-388. (1975).

Fran cilio Paes Lame. Teoría e Técnicas de Tratamiento de Agua CETESB; Jan Paulo Brasil.1980.

Grant, W. D. Life at low water activity. Phil. Trans. R. Soc. Lond., B 359, 1249–1267 (2004).

Gloyna and Caterifelder "Water Quality Improvement by physical and Chemicals Processes" University of Texas Press. Austin and London (1973).

Górny, R. L. Filamentous microorganisms and their fragments in indoor air. Ann Agric Environ Med, 11, 185–197 (2004).

Jiménez, C., Fernández, N., De La Horra, J. M., Rodríguez, E., Isac, L., Salas, D., Gómez, E. Sistema rápido de estimación de los rendimientos en depuración de una E.D.A.R. en función de las características macroscópicas y microscópicas del fango activado. Tecnología del Agua, 216, 40-44 (2001).

Karl Schugerl, John Wiley and Sons. Mc. (1987). Bioreaction Engineering. ReactionInvolving Microorganisms and cells. Vol. 1

Karl Schugerr. John Wiley and Sons. Mc. 1987. Bioreaction Engineering. Characteristic Features of bioreactors. Vol. 2

L. Huisman. "Rapid J and Filtration. Delf University of Technology, Netherlands.

Leal, A., Viñas, L., López, A. J., Navarro, M., Martínez, M. *Depuración de aguas residuales en espacios naturales protegidos de Andalucía*. Junta De Andalucía. Consejería de Medio Ambiente, España (2002).

Lopez-Archilla, A.I., Marin, I., Amils, R. Microbial community composition and ecology of an acidic aquatic environment: The Tinto River, Spain. *Microb Ecol* 41, 20–35 (2001).

M en Ing. Gabriela Moeller Chavez, Biol. Catalina Ferat Toscano. "Microbiología Sanitaria" DEPFIS. UNAM. Pág. 85

Mainstone, C., Parr, W. Phosphorus in rivers. Ecology and management. *The Science of the Total Environment* 282-283, 25-47 (2002).

Margalef, R. *Limnología*. Ed. Omega. Barcelona, España (1983).

Montgomery, J. 1985, "Precipitación Coagulación-floculación", *Water Treatment Principles and Design*, Canada: John Wiley and Sons. pp. 116-171.

Moro, P. Aparición de organismos filamentosos en fangos activos. *Ingeniería Química*, 97, 106 (1998).

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", Norma Oficial Mexicana. pp 2- 5.

Organización Panamericana de la salud "Manual de desinfección división de la salud y Ambiente". Serie Técnica No. 30. 1995.

Oron, G., Bicz, A., Gillerman, L. *Trends and opportunities for small-scale wastewater treatment and reclamation plants in the eastern Mediterranean basin*. Libro de ponencias principales del congreso internacional de tecnologías de pequeña escala para la

depuración y gestión de aguas residuales en el ámbito Mediterráneo. Sevilla, España, 113-130 (2002).

Pelezar/reid/Chan, "Microbiología". Mc Graw-Hill 1982.

Rodríguez, L.J. (1990). "Tratamiento de Aguas Residuales Industriales y sus Soluciones". Estudios, Proyectos e Ingeniería en Aguas Industriales, S.A. de C.V. Zapopan, Jal., México. pp: 28-29.

Suárez, J., Llorente, V., Mogollón, T. Microorganismos Filamentosos en las E.D.A.R.S. Ingeniería Química, 146-151 (1993).

Susuma Kawamura, John Wiley and Sons "Integrated Design of Wastewater Treatment Facilities".mc (1991).

<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico13/153.pdf>

Thompson, G., Forster, C. Bulking in Activated Sludge Plants Treating Paper Mill Wastewaters. Water Research, 37, 2636–2644 (2003).

Uadith Bower Cavberry. "Environmental Systems and Engineering". University of Pelaware, Newark. 1990.

Varios autores. "Manual del Curso Sobre Tecnología de Tratamiento de Agua para países en Desarrollo". Centro Interamericano de Salud 1990.

W. Wesley Eckenfelder, Alan R. Bowers and John A. roth. "Chemical Oxidation technologies for the Nineties". Technomic publishing co. mc. (1991).

Willy J. Masschelein. "Unit Processes in Drinking water treatment". Marcel Dekker Mc. 1992.