



84  
20J  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE QUÍMICA

MEMBROS PROFESIONALES  
CANT. DE QUÍMICA

**TRATAMIENTO FISICOQUÍMICO DE AGUA  
RESIDUAL MEDIANTE NUEVOS POLÍMEROS**

**TESIS QUE :**

**GLORIA MATILDE MARTÍNEZ VALTIERRA**

**PRESENTA PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERA QUÍMICA**



**MÉXICO, D.F. 1996**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO**

**Facultad de Química**

**JURADO DESIGNADO**

|                                |        |                               |
|--------------------------------|--------|-------------------------------|
| <b>Presidente</b>              | Prof : | Joaquín Palacios Alquisira .  |
| <b>Vocal</b>                   | Prof : | Ma. Teresa Orta Ledesma .     |
| <b>Secretario</b>              | Prof : | Jesús Gracia Fadrique .       |
| <b>1<sup>er</sup> suplente</b> | Prof : | Rodolfo Torres Barrera .      |
| <b>2<sup>o</sup> suplente</b>  | Prof : | José Amando Padilla Ramírez . |

**Sitio en que se desarrolló el tema :**

Instituto de Ingeniería, C.U. *UNAM*

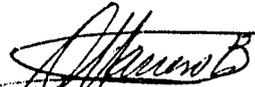
**Asesor de tesis**

  
\_\_\_\_\_  
*Dra. Ma. Teresa Orta Ledesma .*

**Sustentante**

  
\_\_\_\_\_  
*Gloria Maricela Martínez Valtierra .*

**Supervisor Técnico**

  
\_\_\_\_\_  
*Dr. Octavio Manera Brito .*

*Querida mamá :*

*Que este humilde testimonio de amor,  
impreso en letras de molde,  
quede impreso en tu corazón .*

*Porque tu sombra bienhechora  
siempre me cubra con piedad  
y nunca me falte tu presencia .*

*Por esto y por la sinceridad de mi  
amor*

*Dios te dé paz interior  
gozo en tu vida  
y el reconocimiento  
a tu labor .*

*Por todo eres merecedora  
no sólo a este  
testimonio de amor,  
sino a mi devoción  
por toda la vida .*

*Por tu infinita paciencia y comprensión  
que siempre nos brindas, porque siempre a  
tu manera tratas de expresarnos tu amor,*

*Gracias Papá .*

*A mis hermanos Carlos y Gas, por su  
alegría y comprensión, recuerden que  
Dios dijo : Ayúdate que yo te ayudaré*

*A Wilber Matas Medina, por todo  
tu cariño y apoyo incondicional en todo lo  
que hago .*

*Gracias por sus desvelos, por su apoyo  
y por todo su esfuerzo, sin ustedes  
nada de esto hubiera sido posible .*

*A mis amigos : Marisa, Luis, Nieves, Citlali, Angélica, Con, Erika, Reni, Niana, Norman,  
Laura y Gerardo, por hacerme sonreír y estar siempre conmigo en cualquier circunstancia .*

*A la Dra. Ma. Teresa Ortiz Lodesama, por su confianza depositada en mí y por brindarme todas las  
facilidades para lograr éste trabajo .*

*Mis más sinceros agradecimientos a mis asesores técnicos: el Dr. Octavio Manero Brito y la Dra.  
Judith Cardoso Martínez por su valiosa colaboración en la realización de éste trabajo de investigación .*

*A la M. en Z. I. Laura Cabrera quien colaboró en la determinación de metales pesados por absorción  
atómica, a las personas que me brindaron su ayuda técnica durante la elaboración del trabajo  
experimental y a mis compañeros del Instituto de Ingeniería ;  
A la M. en I. Rosa María Flores, a Crispín Romero, a Kike, a Carlos Hurtado, a Lucy, a Rosita,  
a Arturo Meza, a mis compañeros de cubículo, Miguel Ángel, Víctor, Juan Manuel, Jacinto y Dante .*

*y a todas las personas que de alguna manera contribuyeron a que llegara a feliz término ésta tesis, lo  
único que puedo decirles es*

*GRACIAS .*

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

## Facultad de Química

### TRATAMIENTO FISICOQUIMICO DE AGUA RESIDUAL MEDIANTE NUEVOS POLIMEROS .

#### ÍNDICE

|  | <i>Página</i> |
|--|---------------|
| <b>CAPÍTULO I</b>  |               |
| <b>OBJETIVOS</b> .....   | 1             |
| <b>ALCANCES</b> .....  | 2             |
| <b>INTRODUCCIÓN</b> .....  | 3             |
| <br>   |               |
| <b>CAPÍTULO II ANTECEDENTES DEL USO DE TRATAMIENTO<br/>PRIMARIO AVANZADO PARA AGUA RESIDUAL</b>            |               |
| <b>2.1 Bases Teóricas</b> .....  | 8             |
| 2.1.1 <i>NOM-032-CCA-ECOL-1993</i> .....   | 10            |
| 2.1.2 <i>Producción y alojamiento de Lodos</i> .....   | 12            |
| 2.1.3 <i>Plantas Depuradoras con Tratamiento Primario<br/>          Avanzado</i> .....                     | 13            |
| <br>   |               |
| <b>CAPÍTULO III ASPECTOS TEÓRICOS EN EL PROCESO DE<br/>COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN</b>                         |               |
| <b>3.1 Suspensiones coloidales</b> .....   | 15            |
| <b>3.3 Coagulación</b> .....   | 16            |
| <b>3.2 Floculación</b> .....   | 17            |
| 3.3.1 <i>Criterios para lograr una mayor eficiencia en el<br/>          mecanismo de Floculación</i> ..... | 18            |
| 3.3.2 <i>Cinética de Floculación</i> .....   | 27            |
| 3.3.3 <i>Efectos Físicos</i> .....   | 27            |

## CAPÍTULO IV USO DE COAGULANTE EN EL TRATAMIENTO DE AGUA .

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4.1 Tipos de Coagulantes.....</b>        | <b>29</b> |
| 4.1.1 <i>Sulfato de Aluminio.....</i>       | <i>29</i> |
| 4.1.2 <i>Cloruro Férrico.....</i>           | <i>30</i> |
| 4.1.3 <i>Hidróxido de Calcio (Cal).....</i> | <i>31</i> |
| <b>4.2 Remoción de Microorganismos.....</b> | <b>33</b> |
| <b>4.3 Ayuda-Coagulantes.....</b>           | <b>33</b> |

## CAPÍTULO V CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LOS POLÍMEROS ORGANICOS .

|  |           |
|--|-----------|
| <b>5.1 Generalidades de los polímeros orgánicos.....</b>                 | <b>34</b> |
| 5.1.1 <i>Polímeros Sintéticos.....</i>                                   | <i>35</i> |
| <b>5.2 Polielectrolitos empleados en Tratamiento de Agua.....</b>        | <b>36</b> |
| 5.2.1 <i>Catiónicos.....</i>   | <i>38</i> |
| 5.2.2 <i>Aniónicos.....</i>  | <i>42</i> |
| 5.2.3 <i>No iónicos.....</i>   | <i>43</i> |
| 5.2.4 <i>Zwitteriónicos.....</i>   | <i>45</i> |
| <b>5.3 Factores que afectan el uso de los polielectrolitos.....</b>      | <b>48</b> |
| 5.3.1 <i>Aplicaciones al Proceso de Coagulación-Floculación.....</i>     | <i>51</i> |
| 5.3.2 <i>Ventajas de los polímeros floculantes.....</i>                  | <i>54</i> |
| 5.3.3 <i>Ventajas del nuevo floculante zwitteriónico.....</i>            | <i>54</i> |
| 5.3.4 <i>Factores de Salud y Seguridad.....</i>                          | <i>56</i> |
| <b>5.4 Características de la síntesis de los nuevos floculantes.....</b> | <b>56</b> |

## CAPÍTULO VI METODOLOGÍA DE EXPERIMENTACIÓN

|  |           |
|--|-----------|
| <b>6.1 Control del Proceso de Coagulación-Floculación en el Laboratorio.....</b>                     | <b>58</b> |
| 6.1.1 <i>Medición del Potencial Zeta.....</i>  | <i>59</i> |
| 6.1.2 <i>(Procedimiento Convencional) Prueba de Jarras.....</i>                                      | <i>60</i> |
| <b>6.2 Determinación de la influencia de la variabilidad del influente (Sitios de Muestreo).....</b> | <b>62</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>6.3 Determinación de los parámetros fisicoquímicos del influente.....</b> | <b>63</b> |
| 6.3.1 <i>Turbiedad.....</i>  | 63        |
| 6.3.2 <i>Conductividad Eléctrica.....</i>                                    | 64        |
| 6.3.3 <i>pH.....</i>   | 64        |
| 6.3.4 <i>Demanda Química de Oxígeno (DQO).....</i>                           | 65        |
| 6.3.5 <i>Sólidos.....</i>  | 66        |
| 6.3.6 <i>Potencial de Electrodo.....</i>                                     | 66        |
| 6.3.7 <i>Remoción de Metales Pesados.....</i>                                | 67        |
| 6.3.8 <i>Nitrógeno Amoniacal (N-NH<sub>3</sub>).....</i>                     | 67        |
| <b>6.4 Equipo Utilizado para cada prueba.....</b>                            | <b>69</b> |

## **CAPÍTULO VII RESULTADOS**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>7.1 Efecto del uso de distintos coagulantes.....</b>                 | <b>71</b> |
| 7.1.1 <i>Evaluación del Cloruro Férrico como coagulante.....</i>        | 73        |
| 7.1.2 <i>Evaluación del Sulfato de Aluminio como coagulante...</i>      | 76        |
| 7.1.3 <i>Evaluación del Hidróxido de Calcio como coagulante..</i>       | 78        |
| 7.1.4 <i>Determinación de metales pesados.....</i>                      | 81        |
| 7.1.5 <i>Determinación de Nitrógeno Amoniacal N-NH<sub>3</sub>.....</i> | 87        |

## **CAPÍTULO VIII**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....</b> | <b>82</b> |
|---|-----------|

## **APENDICE No.1 y No.2**

## **CAPÍTULO IX**

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b> | <b>123</b> |
|--------------------------|------------|

## APARTADO N°1

### TABLAS REPRESENTATIVAS DEL TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO REALIZADO A NIVEL LABORATORIO

#### RESUMEN

|                   |   |
|-------------------|---|
| Tablas 18-19      | Determinación de metales pesados  |
| Tabla 20          | Determinación de Nitrógeno Amoniacal  |
| Tablas 11,13 y 19 | Caracterización del influente en diferentes periodos  |
| Tablas 20-24      | Ensayos para encontrar dosis óptima de coagulantes (Ca(OH) <sub>2</sub> y Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ) y polielectrolitos zwitteriónicos |
| Tablas 25-26      | Comparación del funcionamiento de los polielectrolitos zwitteriónicos N°3 y N°4., con los polielectrolitos comerciales Prosifloc y Nalcomex                   |

| TABLA |   | Página |
|-------|---|--------|
| 1     | Uso del agua en el mundo.....   | 7      |
| 2     | NOM-CCA-032- ECOL/1993.....   | 11     |
| 3     | Ejemplos de aplicacion en tratamiento de agua con polimeros y su eficiencia.....  | 13     |
| 4     | Velocidades de Sedimentación para partículas de p.cb. en agua a 10 °C.....  | 15     |
| 5     | Polimeros mas comunes usados para la potabilización del agua en Estados Unidos.....   | 37     |
| 6     | Descripción de pesos moleculares de los polimeros.....  | 49     |
| 7     | Régimen utilizado en el experimento.....  | 60     |
| 8     | Equipo y método utilizado para cada prueba.....   | 69     |
| 9     | Muestras y tipos de análisis realizados.....  | 71     |
| 10    | Principales constantes físicas de los polielectrolitos en estudio.....  | 72     |
| 11    | Características del agua del Gran Canal y de la Planta de Ecatepec (Marzo 1994).....  | 75     |
| 12    | Calidad del influente para la coagulación mecánica y diferentes dosis de Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> .....        | 76     |
| 13    | Calidad en el influente en la etapa experimental (Diciembre 94-Enero 95).....   | 77     |
| 14    | Calidad del efluente para la coagulación mecánica y diferentes dosis de Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> .....         | 78     |
| 15    | Calidad obtenida en el efluente con dosis recomendadas de Ca(OH) <sub>2</sub> 250 mg/l y de floculante.....                           | 79     |
| 16    | Resultados encontrados con los diversos coagulantes y los mejores polielectrólitos.....   | 79     |
| 17    | Parámetros comparativos para las mejores dosis de coagulante y floculantes representativos de acuerdo a la NOM-CCA-032-ECOL/1993..... | 80     |
| 18    | Concentraciones de los metales pesados utilizando el polielectrolito zwitteriónico N°2  | 84     |
| 19    | Determinación de metales pesados utilizando los polielectrolitos zwitteriónicos N°3 y N°4.....  | 86     |
| 20    | Determinación de Nitrógeno Amoniacal.....   | 87     |
| 21    | Caracterización del agua influente.....   | 88     |

|    |  |    |
|----|--|----|
| 22 | Calidad obtenida en el influente (Enero de 1995), con la adición de 100 y 200 mg/L de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como coagulante y polielectrolito zwitteriónico N° 1.....   | 89 |
| 23 | Calidad obtenida en el influente (Enero de 1995), con la adición de 230 y 300 mg/L de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como coagulante y polielectrolito zwitteriónico N° 1.....   | 90 |
| 24 | Calidad obtenida en el influente (Enero de 1995), con respecto al coagulante ; con 250 mg/L de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y la adición de 0.2 mg/L de polielectrolito zwitteriónico N°1.....                               | 91 |
| 25 | Resultados generales obtenidos después del tratamiento Primario Avanzado con el uso de Polielectrolito zwitteriónico N° . 2. (mes de Enero 1995).....  | 92 |
| 26 | Calidad obtenida en el influente, con respecto a dos coagulantes ; con 51 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , 250 mg/L de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y la adición de 0.2 mg/L de polielectrolito zwitteriónico N°2..... | 93 |
| 27 | Calidad obtenida en el influente( Mayo de 1995), adicionando como coagulante 250 mg/L de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y 0.1 mg/L de polielectrolito zwitteriónico N°3.....   | 95 |
| 28 | Calidad obtenida en el influente.(Mayo de 1995), adicionando como coagulante 250 mg/L de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y 0.1 mg/L de polielectrolito zwitteriónico N°4.....   | 96 |

## INDICE DE FIGURAS

| FIGURA |   | Página |
|--------|---|--------|
| 1      | Tipos de Tratamiento Primario Avanzado.....   | 9      |
| 2      | Coagulación-Floculación.....  | 16     |
| 3      | Particula de fluido que experimenta la floculación.....   | 18     |
| 4      | Distribución de los fragmentos de polímero .....  | 22     |
| 5      | Posible arreglo de policationes adsorbidos sobre una partícula con baja densidad de carga negativa.....   | 25     |
| 6      | Diagrama general que muestra la pérdida de fuerza catiónica para poliaminas terciarias al aumentar el pH y la no dependencia de los coagulantes de aminas cuaternarias respecto a éste..... | 39     |
| 7      | Sal interna de la poli 4-vinilsulfo propilpiridina.....   | 46     |
| 8      | Sal interna de la poli[hexilmetacril 1-(3-sulfopropil)amonio].....  | 46     |
| 9      | Polielectrolito Zwitteriónico p-(DAEM).....   | 57     |
| 10     | Relación de dosis coagulante-floculante vs Potencial Zeta.....  | 59     |
| 11     | Resultados del Tratamiento del agua de Gran Canal mediante el empleo de $\text{FeCl}_3$ y polielectrolitos.....   | 73     |
| 12     | Resultados del Tratamiento del agua de Gran Canal mediante $\text{FeCl}_3$ -ICA y Zwitteriónico.....  | 74     |
| 13     | Remoción de Turbiedad, SST y $\text{DQO}_T$ con Coagulación Mecánica y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ .....   | 77     |

## APARTADO N°2

### GRÁFICAS REPRESENTATIVAS DEL TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO REALIZADO A NIVEL LABORATORIO

#### RESUMEN

- Gráficos 1-14      Ensayos para encontrar dosis óptima de coagulantes  $\text{Ca(OH)}_2$  y  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  tomando como parámetros UTN, DQO y SST con el polielectrolito zwitteriónico N°1
- Gráficos 15-17      Ensayos para encontrar dosis óptima de coagulante  $\text{Ca(OH)}_2$  tomando como parámetros UTN, DQO y SST con el polielectrolito zwitteriónico N°2
- Gráficos 18-20      Ensayos para encontrar dosis óptima de coagulante  $\text{Ca(OH)}_2$  tomando como parámetros UTN, DQO y SST con el polielectrolito zwitteriónico N°3
- Gráficos 21-23      Ensayos para encontrar dosis óptima de coagulante  $\text{Ca(OH)}_2$  tomando como parámetros UTN, DQO y SST con el polielectrolito zwitteriónico N°4

| Gráfico |   | Página |
|---------|---|--------|
| 1       | Remoción de UTN con una dosis de 230 mg/L de $\text{Ca(OH)}_2$ con diferentes dosis de polímero Zwitteriónico N°1.....  | 97     |
| 2       | Remoción en SST con una dosis de $\text{Ca(OH)}_2$ de 230 mg/L y polímero zwitteriónico N°1 (0.2 mg/L).....   | 98     |
| 3       | Remoción de DQO con una dosis de 230 mg/L de $\text{Ca(OH)}_2$ con diferentes dosis de polímero Zwitteriónico N°1(0.2 mg/L).....  | 99     |
| 4       | Acción del $\text{Ca(OH)}_2$ con 130 y 200 mg/L con polielectrolito Zwitteriónico N°1 en dosis del 0.6 y 0.8 mg/L .....   | 100    |
| 5       | Remoción de SST con diferentes dosis de polielectrolito Zwitteriónico N°1, de 0.6 y 0.8 mg/L. con 130 y 200 mg/L de $\text{Ca(OH)}_2$ .....   | 101    |
| 6       | Remoción de DQO con respecto a la variación en la dosis de polielectrolito Zwitteriónico N°1, de 0.6 y 0.8 mg/L. Variando la concentración de $\text{Ca(OH)}_2$ en 130 y 200 mg/L ..... | 102    |
| 7       | Remoción de la UTN con 300 mg/L de $\text{Ca(OH)}_2$ , variación en la dosis de polielectrolito Zwitteriónico N°1.....  | 103    |
| 8       | Remoción de SST con una dosis de coagulante de 300 mg/L, probados con diferentes dosis de polímero zwitteriónico N°1.....   | 104    |
| 9       | Remoción de DQO con una dosis de coagulante de 300 mg/L, probados con diferentes dosis de polímero zwitteriónico N°1.....   | 105    |
| 10      | Remoción de UTN con polielectrolito zwitteriónico N°1 en diferentes dosis,  | 106    |

|    |   |     |
|----|---|-----|
|    | manteniendo dosis constantes de sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ .....  |     |
| 11 | Remoción de DQO utilizando diferentes dosis de $Al_2(SO_4)_3$ y 0.6 mg/L de polielectrolito zwitteriónico N°1.....  | 107 |
| 12 | Remoción de UTN con el polielectrolito zwitteriónico N°1 con 250 mg/L de $Ca(OH)_2$ .....   | 108 |
| 13 | Remoción de SST con el polielectrolito zwitteriónico N°1 con 250 mg/L de $Ca(OH)_2$ .....   | 109 |
| 14 | Remoción de DQO con el polielectrolito zwitteriónico N°1 con 250 mg/L de $Ca(OH)_2$ .....   | 110 |
| 15 | Remoción de UTN con una dosis de 250 mg/L de coagulante la cuál fué tomada como la dosis recomendada, vs las diferentes dosis de polímero zwitteriónico N° 2.....   | 111 |
| 16 | Remoción de SST con una dosis de 250 mg/L de $Ca(OH)_2$ diferentes dosis de polímero zwitteriónico N° 2 (0.2 mg/L).....   | 112 |
| 17 | Remoción de DQO con una dosis de 250 mg/L de $Ca(OH)_2$ la cuál fué tomada como la dosis recomendada, vs las diferentes dosis de polímero zwitteriónico N° 2.....   | 113 |
| 18 | Remoción de UTN con una dosis de 250 mg/L de $Ca(OH)_2$ la cuál fué tomada como la dosis recomendada, vs las diferentes dosis de polímero zwitteriónico N° 3.....   | 114 |
| 19 | Remoción de SST con una dosis de 250 mg/L de $Ca(OH)_2$ la cuál fué tomada como la dosis recomendada, vs las diferentes dosis de polímero zwitteriónico N° 3.....   | 115 |
| 20 | Remoción de DQO con una dosis de 250 mg/L de $Ca(OH)_2$ la cuál fué tomada como la dosis recomendada, vs las diferentes dosis de polímero zwitteriónico N° 3.....   | 116 |
| 21 | Remoción de UTN con una dosis de 250 mg/L de $Ca(OH)_2$ la cuál fué tomada como la dosis recomendada, vs las diferentes dosis de polímero zwitteriónico N° 4.....   | 117 |
| 22 | Remoción de SST con una dosis de 250 mg/L de $Ca(OH)_2$ la cuál fué tomada como la dosis recomendada, vs las diferentes dosis de polímero zwitteriónico N° 4.....   | 118 |
| 23 | Remoción de DQO con una dosis de 250 mg/L de $Ca(OH)_2$ la cuál fué tomada como la dosis recomendada, vs las diferentes dosis de polímero zwitteriónico N° 4.....   | 119 |
| 24 | Eficiencia en remoción de Turbiedad vs concentración de $Ca(OH)_2$ .....  | 120 |
| 25 | Eficiencia en remoción de Turbiedad vs concentración de $Al_2(SO_4)_3$ .....  | 120 |
| 26 | Eficiencia en remoción de Turbiedad vs concentración de los diferentes polielectrolitos zwitteriónicos y dos aniónicos comerciales manteniendo una dosis constante de $Ca(OH)_2$ (250 mg/L).....                      | 121 |
| 27 | Comparación de la actividad de los 4 tipos de polielectrolitos zwitteriónicos con respecto a SST, DQO y UTN, con 250 mg/L de $Ca(OH)_2$ , pH= 8.5-9.0 considerando las dosis recomendadas para cada uno de ellos..... | 121 |

|    |   |     |
|----|---|-----|
| 28 | Comparación de la actividad de los 4 tipos de polielectrolitos zwitteriónicos y los 2 polielectrolitos comerciales Prosifloc y Nalcomex con respecto a SST, DQO y UTN, con 250 mg/L de $\text{Ca(OH)}_2$ , pH= 8.5-9.0 considerando las dosis recomendadas para cada uno..... | 122 |
|----|---|-----|

*Esta tesis formó parte de un proyecto de investigación con el cuál se pretende dar solución al problema del desagüe de la ciudad de México y se llevó a cabo bajo la dirección de la **Dra. Ma. Teresa Orta Ledesma**, quien me otorgó el apoyo de una beca en el Instituto de Ingeniería de la UNAM .*

## OBJETIVOS

---

El objetivo de este trabajo, es hacer un estudio comparativo entre los polímeros orgánicos de alto peso molecular, con estructura Zwitteriónica y los polímeros que se utilizan comercialmente para la remoción de material particulado en el tratamiento de agua por medio del proceso de Coagulación-Floculación .

### OBJETIVOS ESPECIFICOS :

- Evaluar la eficiencia de una nueva estructura polimérica de carácter zwitteriónico y escoger una de las 4 estructuras que se sintetizaron, (las cuales se diferencian sólo por su proceso de neutralización) la que funcione mejor según su peso molecular, para llevar a cabo el proceso de floculación .
  
- Encontrar la dosis óptima de coagulante y de polielectrolito con la cuál se obtenga la mayor remoción de Turbidez, Demanda Química de Oxígeno y Sólidos Suspendedos Totales, en el tratamiento de agua residual para lograr que el efluente cumpla con la norma NOM-CCA-032-ECOL/1993 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales de origen urbano y municipal para su disposición en riego agrícola .

## ALCANCES

---

Este trabajo forma parte de un proyecto extenso, en donde se investiga la mejor posibilidad de tratamiento de aguas del Gran Canal del Distrito Federal mediante un Tratamiento Primario Avanzado .

En éste estudio se pretende dar a conocer la información más reciente acerca de la actividad de un nuevo polielectrolito el cual tiene grandes posibilidades de ser utilizado en el tratamiento de agua ; ya que, demostró ser competente con los demas polielectrolitos que se utilizan comercialmente .

Para los fines de ésta investigación nos concentraremos en los polielectrolitos con los cuales se ha logrado una aplicación eficaz en el tratamiento de aguas, en virtud de que tienen la capacidad de desarrollar ésta tarea a un precio que hace posible su uso .

Por medio de éste estudio se podrá deducir qué tipo de neutralización en la síntesis de la estructura química de un floculante sintético dentro de los 4 tipos del mismo, es la apropiada para aplicaciones en el tratamiento de agua residual, de tal forma que pueda considerarse como una innovación tecnológica susceptible a ser producido en el país con aplicaciones que puedan desplazar a los productos comerciales que normalmente son producidos en el extranjero .

# CAPITULO I

---

## INTRODUCCION

Uno de los problemas ambientales más grandes que existen hoy en día es la contaminación del agua y para solucionarlo se han implementado numerosas tecnologías ; como es el caso desde hace casi 100 años del reuso de agua residual de la cd. de México en el valle de Mezquital, Hgo . De lo anterior surgió la necesidad de buscar un sistema de tratamiento que guardara los beneficios de aporte de nutrientes, pero que también asegurara el control bacteriológico . Debido a la gran necesidad de agua que tenemos todos los seres vivos, la reutilización ; forma parte de las prácticas habituales.

El Tratamiento Primario Avanzado, es una opción tecnológica para la posible construcción de una Planta de Tratamiento de aguas negras de las aguas del Gran Canal, que por su magnitud, sería una de las más grandes del mundo .

El apoyo teórico considera la explicación del proceso de Coagulación-Floculación por medio de Prueba de Jarras, la aplicación del mismo en el tratamiento de agua, así como los diferentes tipos de polielectrolitos y sus características .

En éste trabajo se da una introducción al Tratamiento Primario Avanzado y su fundamento basado en el proceso de Coagulación-Floculación mediante polímeros floculantes y sales metálicas .

Los polímeros floculantes en estudio fueron proporcionados para probar su eficacia en el tratamiento de agua residual; por el Instituto de Materiales y la UAM-I, en donde fueron sintetizados y caracterizados .

## EL AGUA Y LA ORGANIZACION SOCIAL

El agua ocupa el 75% de la superficie del planeta, ésto es las tres cuartas partes de su superficie están ocupadas por agua y el resto por los continentes .

La tierra tiene 1,385 millones de  $\text{km}^3$  de agua, de éstos la mayor parte (94%) se encuentra en los océanos, el resto se distribuye en los depósitos profundos de agua subterránea o formando grandes bloques de hielo .

Con la aparición de la agricultura, el hombre se hace sedentario y se agrupa cerca de los ríos y manantiales .

Aunque desconocemos muchos de los avances tecnológicos de las culturas de Mesoamérica, podemos afirmar la gran importancia que tenía el agua para ellas independientemente de su grado de civilización su desarrollo está vinculado a la

producción agrícola, por ello la disponibilidad de agua para irrigación es uno de los factores fundamentales en la localización de agrupamientos urbanos .

## **LA EVOLUCION DE LA SOCIEDAD Y EL AGUA.**

La revolución industrial iniciada a mediados del siglo XIX a raíz de los grandes avances de la ciencia y la tecnología, modifica sustancialmente las relaciones socioeconómicas y los patrones de desarrollo que prevalecen hasta éste momento, de una sociedad rural se pasó a una sociedad urbana e industrializada .

En el siglo XX debido al avance tecnológico, algunas ciudades se transforman en urbes modernas que encierran un conglomerado de actividades .

La demanda de agua por parte de la humanidad ha ido en constante aumento, como consecuencia del crecimiento de la población y de su actividad económica . Los datos a éste respecto son espectaculares, la población mundial ha crecido en lo que va del siglo 2.2 veces, mientras que el consumo de agua se ha multiplicado por 7 .

En términos comparativos, podemos afirmar que a medida que aumenta el proceso de urbanización de los países, el porcentaje de agua utilizado por la agricultura disminuye mientras que aumenta el correspondiente a la industria, especialmente la producción de energía y las necesidades de la población en general .

Para poder cubrir las demandas de agua cada vez mayores el hombre se ha visto obligado a transportar éste recurso a través de grandes distancias . Las presas de almacenamiento, acueductos, canales, las perforaciones de pozos, las canalizaciones y derivaciones de los ríos, además de las redes urbanas de distribución son parte de la costosa infraestructura que se va construyendo sobre la superficie terrestre para llevar el agua hasta donde se necesita . (El Agua y la Sociedad .SEP, IMTA, CNA .,1993)

Por ejemplo ; la cd. de México además de estar sobrepoblada, se encuentra a 2200 m sobre el nivel del mar por lo que se tiene que importar el agua que se necesita de lugares más bajos y lejanos (son más de 130 km del río Cutzamala al D.F.) .

## **CARACTERISTICAS DEL AGUA**

El agua es la unión de 2 átomos de hidrógeno y uno de oxígeno que forman una molécula cuyas propiedades físicas y químicas, como densidad, adhesión, calor específico, solubilidad, tensión superficial, etc. hacen del agua un líquido insustituible, en la que la variación de éstos factores tiene consecuencias biológicas muy importantes .

El agua es el vehículo y el disolvente por excelencia mediante el cuál los nutrientes llegan a plantas y animales, además la molécula de agua presenta características físicas que la diferencian de otros compuestos químicos de estructura similar .

Cuando se encuentra en estado sólido es más ligera que en estado líquido por lo que el hielo flota, así el fenómeno de flotación evita la congelación total del mar en los polos y permite que muchos organismos puedan vivir debajo de las capas de hielo .

## CONTAMINACION

En México la industria cuenta aproximadamente con 40 mil industrias contaminantes tales como la Industria Azucarera, la Industria Química y Petrolera, la del Papel y Celulosa, la de Bebida (refrescos, cerveza, etc ), la Industria Textil, la Industria Siderúrgica, la de Electricidad y la de Alimentos, que utilizan todo tipo de materias que van a dar al agua de ríos, mares, lagos y mantos freáticos .

A la industria Química y Petroquímica le debemos gran parte de los satisfactores de nuestras necesidades diarias que nos brinda el desarrollo y que por el momento nos parecen muy difíciles de sustituir como las gasolinas, detergentes, insecticidas, plásticos, disolventes, fertilizantes, gases, alquitrán, petróleo, aditivos, fibras sintéticas, entre muchos otros con el grave inconveniente de que todos son contaminantes del medio ambiente . (La industria en la ciudad de México, 1993)

En los últimos 50 años se han vertido en el mar más desperdicios y petróleo que en los anteriores veinte siglos, incluyendo los desechos radiactivos . Esto se dió porque durante muchos años solo se atacó la contaminación del aire y se olvidaron que el agua también podía contaminarse, se dió lógica preferencia al desarrollo industrial como fuente de empleo y recursos económicos y no se tenía ninguna consideración con el ambiente .

Una solución que han puesto en práctica los países de 1<sup>er</sup>, mundo es el tratamiento de aguas residuales industriales antes de su descarga a las redes colectoras . Otra solución es el reuso de las aguas residuales en la fabricación de productos como alcohol, pasta de celulosa, salvados, forrajes, combustibles y hasta vitaminas .

Si el tratamiento de purificación de agua no es completo, siguen quedando compuestos tóxicos como cianuros, gasolinas, sales de cobre o de cromo, aceites, etc.

Para las aguas de las lecherías y de las industrias lácteas, las tenerías, las papeleras, las plantas de hulla o la madera, las refinerías, ingenios, tintorerías, petroquímica y otras ya se han descubierto métodos para que sus procesos no sean tan contaminantes ; solo falta obligar a las industrias a instalarlos (Revista CONACYT, 1990). La industria se ha hecho de fabulosas ganancias a costa del medio ambiente y es justo que deje ya de hacerlo y empezar a restaurarlo .

La contaminación de origen urbano incluye: los desechos de materias fecales, los detergentes, la basura, el agua de lluvia que recoge una gran cantidad de contaminantes en las ciudades . La cd. de México D.F. con sus 19 millones de habitantes ocupa el 1<sup>er</sup>. lugar en *consumo y contaminación* de agua . En contraste con otras ciudades del mundo en las que las aguas del drenaje son recicladas, sólo un 5% del agua contaminada de la ciudad es tratada, el resto se reusa en riego agrícola sin ningún tratamiento . En el mundo se puede observar a partir de los porcentajes correspondientes a :

|             |      |            |     |
|-------------|------|------------|-----|
| Estocolmo   | 100% | Madrid     | 98% |
| Londres     | 83%  | Nueva York | 70% |
| Los Angeles | 70%  | Paris      | 64% |
| Quebéc      | 56%  | Tokio      | 33% |
| México      | 5%   |            |     |

La cd. de México se encuentra en un cerrado valle de 2,200 m de altura, sin salida para el aire o las aguas, además de que fué construida sin respetar su antigua calidad de ciudad lacustre ; para protegerla de las inundaciones se han abierto tajos y drenajes profundos que lleven el agua residual fuera del valle y, es finalmente dispuesta en ríos (Tula y luego Pánuco) hasta ir finalmente al Golfo de México .

Como se mencionó inicialmente, éstas aguas se utilizaban para regar 50 mil hectáreas en el valle de Tula donde se cultivaba alfalfa, trigo, chile, maíz, jitomate, frijol, calabaza, etc., que luego son consumidos en la cd. de México . Las materias fecales descargadas en el agua sin tratamiento contienen virus y bacterias filtrantes que son resistentes a todos los antibióticos, de ese modo el agua del drenaje que va a dar al mar, a ríos, lagos y campos de sembradío es un vector de contaminación, que representa un alto riesgo de enfermedades sobre todo gastrointestinales .

Otro tipo de contaminante son los detergentes, que son productos químicos elaborados -entre otros compuestos- con fosfatos . Al entrar en contacto con el agua, los detergentes eliminan grasa y suciedad, pero también matan peces, algas y microorganismos que viven en ríos y lagos .

Anteriormente lo más utilizado era el jabón, pero conforme avanza la tecnología se utilizan compuestos más complejos para la limpieza los cuáles no son fácilmente degradados mientras que el jabón es inmediatamente adsorbido y degradado por las bacterias cuando penetra en el agua . Con los detergentes no sucede lo mismo , es decir el jabón es biodegradable . Algunos detergentes se anuncian como biológicos lo que no significa que sean biodegradables .

Uno de los contaminantes más agresivos para el agua es la basura industrial, los residuos casi todos tóxicos que generan las industrias petroquímica, siderúrgica, textilera, farmacéutica, electrónica, papelera o metalúrgica y la basura urbana, la cuál se divide en 4 tipos :

- Orgánica:** (también reciclable) comida, plantas y animales muertos, papel, madera, cartón, trapo, cuero y desechos humanos .
- Inorgánica:** materiales de construcción (cascajo), hules y plásticos, pilas .
- Reciclable:** metales, vidrio, papel y cartón .
- Peligrosa:** Residuos inflamables, infecciosos, reactivos, explosivos, tóxicos, corrosivos o radiactivos.

Los gases y humos que se producen al quemar gasolinas, petróleo, carbón mineral y sus derivados contienen azúfre cuyos óxidos, al combinarse con el agua de las nubes hacen caer la llamada lluvia ácida, contaminando los ríos y lagos, daña las cosechas, quema los árboles y corroe los edificios .

## FUENTES ALTERNATIVAS DE AGUA POTABLE

Desde tiempos remotos el agua de lluvia se ha almacenado en presas y bordos; aljibes y cisternas, para usarla en tiempos de sequía o la perforación de pozos para captar el agua subterránea .

Una fuente alternativa muy costosa es la desalación del agua de mar, el costo de un litro de agua desalada es superior al del agua natural después de su tratamiento (que cada vez resulta más caro) . La desalación del mar, no está a nuestro alcance todavía, y estará cuando se pueda manejar la tecnología solar en la escala apropiada para obtener agua destilada a bajo costo .

Recordemos que nuestra salud depende del agua que tomemos . El agua contaminada es un vector que transmite todo tipo de enfermedades, mata plantas, animales y peces, envenena lo que comemos y nos enferma .

El cuidado del agua en los últimos años se ha considerado como prioritaria en los planes de gobierno intentando buscar la manera de:

- Reciclar el agua del drenaje (para usos industriales) .
- Cuidar efectivamente a las empresas contaminadoras .
- Cerrar las innumerables tomas clandestinas de agua .

Otras acciones que se podrían considerar son :

- Construir instalaciones para captar el agua de la lluvia .
- Prohibir la descarga de sustancias sólidas e inflamables en el drenaje .

La tercera parte de nuestra población no tiene acceso al agua potable . El 40% del agua se pierde en los servicios doméstico, industrial y sobre todo en el riego agrícola .

| Uso del agua en el mundo | Consumo (en km <sup>3</sup> ) en la década de 1900 | %     | Consumo estimado para el año 2015 en km <sup>3</sup> | %     | Incremento N° de veces |
|--------------------------|--|-------|--|-------|------------------------|
| Doméstico                | 20   | 5.0   | 650  | 8.0   | 32.50                  |
| Agrícola                 | 350  | 87.5  | 4700   | 58.0  | 13.43                  |
| Industrial               | 30   | 7.5   | 2750   | 34.0  | 91.66                  |
| Totales                  | 400  | 100.0 | 8100   | 100.0 | 20.25                  |

Tabla No.1 (La destrucción de la naturaleza, Vazquez, Bonnefus E., 1990)

## CAPITULO II

---

### ANTECEDENTES DEL USO DEL TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO PARA AGUA RESIDUAL .

#### 2.1 BASES TEÓRICAS

El Tratamiento Primario Avanzado involucra tres aspectos : La desestabilización de los Sólidos Suspendidos, la formación de floculos y la eliminación de éstos de la suspensión (los dos primeros aspectos se ven en la teoría de Coagulación-Floculación y el último en la de Sedimentación ) .

El Tratamiento Primario Avanzado es una tecnología que permite obtener agua residual a un nivel compatible con las necesidades de riego agrícola a un costo menor (50%) que el proceso biológico y consta de cuatro configuraciones comunes que son las siguientes :

a) *Tratamiento Primario Convencional* que consiste básicamente en desarenación y sedimentación primaria . Su eficiencia se encuentra alrededor de 65% en remoción de Sólidos Suspendidos y 30% en DBO .

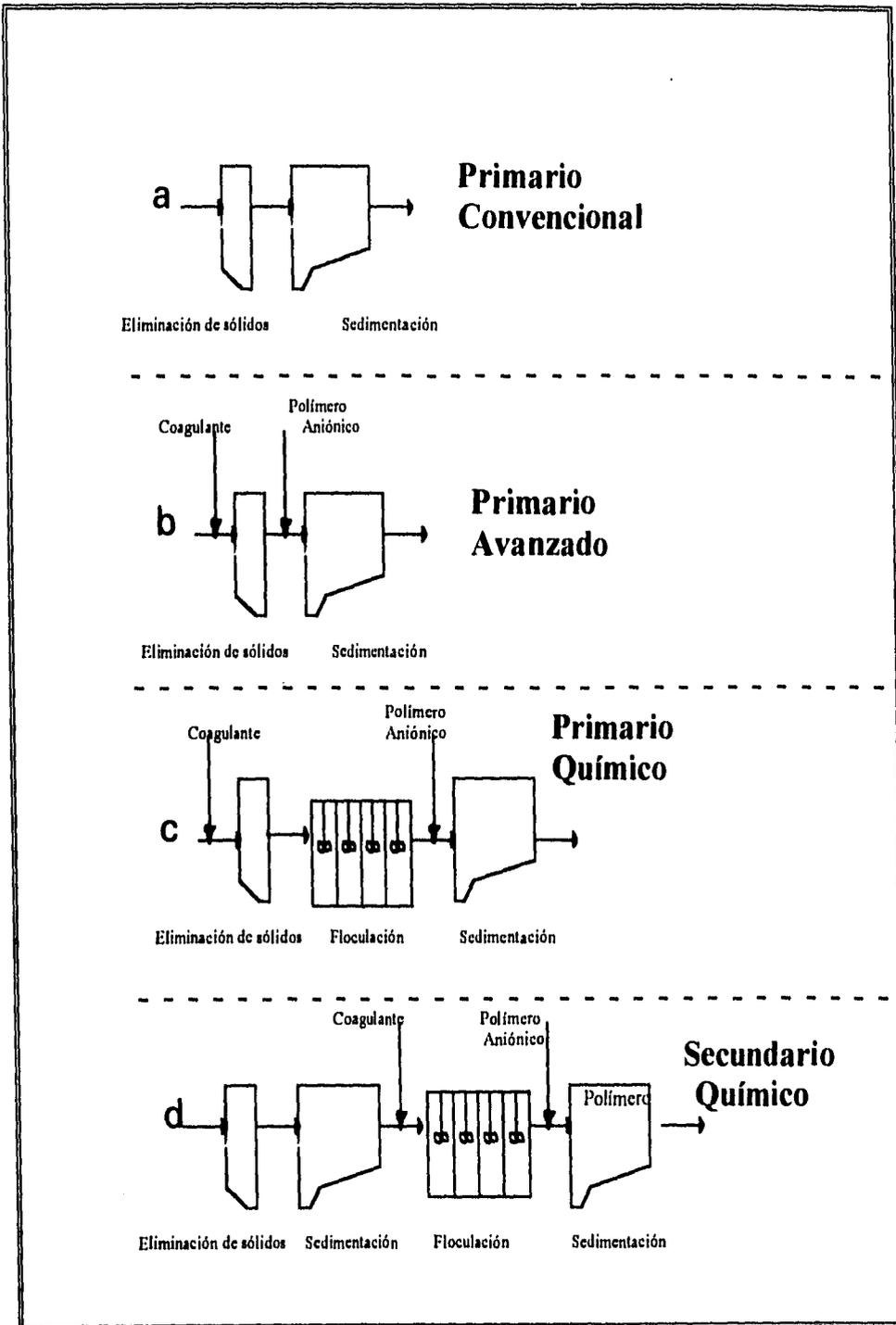
b) *Tratamiento Primario Avanzado* que tiene una configuración igual a la anterior pero se añaden reactivos químicos : generalmente se emplea cloruro férrico con dosis de 10 a 40 mg/L combinadas con pequeñas cantidades de polímeros aniónicos .

Este proceso abate del 80 a 85% de los Sólidos Suspendidos y de 50 a 55% de la DBO . Se adapta muy fácilmente en plantas en operación .

c) *Tratamiento Químico Primario* . En éste caso se tiene una unidad de coagulación-floculación antes de la sedimentación . Se emplea con frecuencia en Noruega y Suecia donde el criterio de diseño para la etapa primaria se basa, además, en la eliminación de fósforo, en los Sólidos Suspendidos y la DBO . En éste caso las dosis empleadas son altas (150 mg/L de cloruro férrico con 0.2 mg/L de polielectrolito aniónico), con eficiencias de más del 90% para los sólidos, 75% para la DBO y 95% para el fósforo en agua residual doméstica .

d) *Tratamiento Químico de dos etapas* . Este proceso se desarrolló en 1980 y consiste en añadir reactivos en dos etapas . La primera es un tratamiento primario avanzado la segunda es un proceso de Floculación . (Ooten R.J.,et.al., 1993) .

**FIG.(1) Cuatro tipos de Tratamiento Primario Avanzado**  
**Fuente : (Ooten R.J.,et.al., 1993,Water Environment Federation) .**



El Tratamiento Primario Avanzado se usa cuando el agua tratada se emplea para riego y es necesario aportar al suelo Nitrógeno, Fósforo y materia orgánica o bien cuando la descarga del efluente es hacia el mar en zonas de alta dilución y es intrascendente pagar por un mejor efluente . Además es útil para cuando se tienen plantas secundarias a su máxima capacidad y se desea ampliar la eficiencia a bajo costo . La mayor ventaja del proceso es mantener una eficiencia constante en gastos de alta variabilidad tanto en volumen como en características fisicoquímicas . Otras ventajas son :

Disminuye el requerimiento de Oxígeno y el tamaño del reactor biológico cuando se usa en combinación con tratamiento biológico aeróbico secundario .

### **2.1.1 NOM-CCA-032-ECOL/1993**

Entre otras ventajas es capaz de remover metales pesados como Pb, As, Cu, Cd con eficiencias del 70% . A continuación se presenta la Norma 032 para Descargas de Aguas de origen urbano o municipal para su disposición mediante riego agrícola con el fin de dar un panorama general de los valores en los parámetros medibles que exige la Ley (Normas Oficiales Mexicanas), de los que tiene como influente y los valores que se logran con el tratamiento como se observará más adelante (CNA. "*Saneamiento del Valle de México*",1994.) .

**TABLA No.2 NOM-CCA-032-ECOL/1993**

**DESCARGAS DE AGUAS DE ORIGEN URBANO O MUNICIPAL PARA SU  
DISPOSICION MEDIANTE RIEGO AGRICOLA .**

| <b>PARAMETROS</b>                       | <b>LIMITE MAXIMO<br/>PERMISIBLE</b> |
|---|-------------------------------------|
| pH                                      | 6.5 a 8.5                           |
| Sólidos Suspendidos Totales<br>(mg/L)   | 120                                 |
| Demanda Bioquímica de<br>Oxígeno (mg/l) | 120                                 |
| Aluminio (mg/L)                         | 5.0                                 |
| Arsénico (mg/L)                         | 0.1                                 |
| Boro (mg/L)                             | 1.5                                 |
| Cadmio (mg/L)                           | 0.5                                 |
| Cianuros (mg/L)                         | 0.02                                |
| Cobre (mg/L)                            | 0.2                                 |
| Cromo (mg/L)                            | 0.1                                 |
| Fierro (mg/L)                           | 5.0                                 |
| Fluoruros (mg/L)                        | 3.0                                 |
| Manganeso (mg/L)                        | 0.2                                 |
| Niquel (mg/L)                           | 0.2                                 |
| Plomo (mg/L)                            | 5.0                                 |
| Selenio (mg/L)                          | 0.02                                |
| Zinc (mg/L)                             | 2.0                                 |

### 2.1.2 Producción y alojamiento de lodos :

La producción de lodos cuando se usan polímeros orgánicos es menor que cuando se usan sales inorgánicas, aunque por sí solos no influyen mucho en el peso, ni producen combinación química con otros iones para formar precipitados en el agua (Walze and Schwoyer 1981, O'Melia et al. 1982), esto se debe a que el mecanismo de floculación se refiere a la desestabilización por la adsorción del polímero mediante puentes partícula-polímero-partícula cuya fuerza de atracción se da por fuerzas de Van der Waals .

Cuando una sal metálica tal como  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $FeCl_3$ , un óxido o hidróxido metálico, en el caso de la cal  $CaO$  o  $Ca(OH)_2$ , se utilizan como coagulante en concentraciones suficientemente altas para ocasionar la precipitación rápida de un hidróxido metálico o carbonato metálico, las partículas coloidales pueden quedar inmersas dentro de éstos precipitados a medida que éstos se forman . La velocidad de precipitación de un hidróxido metálico depende del grado de sobresaturación de la solución . Cuando el pH de la solución está en el rango neutro y ácido, la velocidad de precipitación viene también incrementada por la presencia de aniones . Los iones sulfato son particularmente efectivos para la formación del precipitado, de tal modo que la velocidad de precipitación aumenta al aumentar la concentración de partículas coloidales que deben eliminarse .

Esto puede dar lugar a una relación inversa entre la dosificación óptima de coagulante y la concentración de material que deba eliminarse (Weber, et. al 1988), es decir, cuanto mayor sea la cantidad de materia coloidal del agua, menor será la cantidad de coagulante metálico que se requiere para llevar a cabo ésta eliminación .

La separación de los sólidos de los líquidos en el lodo por medios mecánicos es difícil y requiere tratamiento con floculantes, que pueden ser inorgánicos pero más a menudo son poliméricos . El principal tratamiento inorgánico es  $FeCl_3 + Ca(OH)_2$  utilizado en concentraciones de 20-60 kg de  $FeCl_3$  y 75-180 kg de  $Ca(OH)_2$  por tonelada métrica de sólidos en el lodo seco . Este tratamiento se utiliza primariamente con filtros con vacío y filtros a presión .

Los polielectrolitos catiónicos de peso molecular alto a ultra-alto utilizados en la separación son copolímeros de acrilamida con el monómero catiónico descrito antes ; las concentraciones están entre 1 y 7 kg de polímero por ton. de sólidos en el lodo seco .

Los floculantes poliméricos se utilizan junto con centrifugas, filtros con vacío, filtros con presión y secadores .

Para lodos de plantas de hierro y acero se utilizan polielectrolitos aniónicos es decir copolímero acrilamida-acido acrílico de alto peso molecular . Sin importar el floculante, se necesitan mayores concentraciones para lodos secundarios que para los primarios .

Las pequeñas cantidades de polímero adicionales como coadyuvante optimizan el proceso aumentando la eficiencia y reduciendo el costo total .

### 2.1.3 Plantas depuradoras con Tratamiento Primario Avanzado . (Bratby J.R.,Journal AWWA,1981)

**TABLA No 3 EJEMPLOS DE APLICACION EN TRATAMIENTO DE AGUA CON POLIMEROS Y SU EFICIENCIA**

| Lugar de aplicación  | Tipo de Polímero                | Tipo de agua  | Dosis de Coagulante  | Dosis de Polímero      | pH de operación     | Eficiencia   |
|--|---------------------------------|---|--|------------------------|---------------------|--|
| UNAM. Instituto de Ingeniería                                    | Zwitteriónico                   | Residual  | Ca(OH) <sub>2</sub> , 200 mg/L                                       | 0.1 mg/L               | Amplio rango (2-10) | Alta (sup.al 85%)<br>En sólidos, Turbiedad y COT, floculo muy compacto.      |
| Brasilia (Lago Descoberto)                                       | Aniónico                        | Superficial   | Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> , 3 mg/L             | 0.15 mg/L              | 6.4                 | Estabilidad en el floculo y remoció de turbiedad. Se abatieron costos.(55%)  |
| Companhia de Agua e Esgoto de Brasilia. (CAESB))                 | Anionico                        | Superficial   | Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub><br>15 mg/L<br>3 mg/L | 0.15 mg/L<br>0.15 mg/L | 7.6-6.4             | Buena sedimentación de lodos. Se implantaron mejoras en el proc de mezclado. |
| E.U.   | Cationico<br>PolyDADMAC         | Agua acida prov de desechos industriales y de mineria,y con alto contenido de materia organica. | Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub><br>10 - 100 mg/L     | 0.2 -1 mg/L            | menor de 7          | Alta, se usa para la recuperaci3n de carb3n                                  |
| E.U.   | Aniónicos (aminas cuaternarias) | Agua residual con alto contenido de carga inorganica  | Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub><br>10-100 mg/L       | 0.1 -10 mg/L           | mayor a 7           | Alta   |
| E.U.   | Cati3nicos                      | Desechos de Industria papelera  | Sales de Aluminio<br>0 - 100 mg/L                                    | 0.01 - 10 mg/L         | menor a 7           | Alta   |
| University of North Carolina in Chapel Hill N.C. (Orange County) | Cati3nico                       | Agua Superficial de Lago con alto contenido de carga organica ( 6-10 mg/L de COT)               | Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 22 mg/L              | 0.05 mg/L              | 6.5 - 7.5           | Alta Remoci3n de s3lidos, turbiedad y COT.                                   |

## CAPITULO III

---

### ASPECTOS TEORICOS EN EL PROCESO DE COAGULACION-FLOCULACIÓN .

Las impurezas del agua varían en tamaño desde unos pocos Angström para sustancias solubles hasta unos pocos cientos de micrones ( $\mu$ ) para materia en suspensión .

La eliminación de una gran proporción de éstas impurezas se lleva a cabo por sedimentación en el tratamiento de agua residual, sin embargo, debido a que muchas de éstas impurezas son demasiado pequeñas para obtener un proceso de eliminación eficiente por sedimentación basado sólo en la gravedad, es preciso llevar a cabo la agregación de éstas partículas en agregados de mayor tamaño y más fácilmente decantables con el fin de obtener una separación satisfactoria por sedimentación o flotación . Este proceso de agregación se llama **Coagulación** y la **Floculación** es el proceso mediante el cual se completa el anterior en donde se utilizan polímeros orgánicos sintéticos de alto peso molecular . (Weber,Jr; **Physicochemical Process for Water Quality Control,1988**)

El presente trabajo, constituye un tratamiento primario avanzado para el agua residual utilizando el proceso fisico-químico de *Coagulación-floculación* y nuevos polímeros floculantes de tipo zwitteriónicos como ayuda-coagulantes, sustituyendo al tratamiento biológico clásico .

La invención y uso de los polielectrolitos sintéticos ha ido aumentando rápidamente en los últimos veinte años . Este lento desarrollo se debe atribuir a la poca presión y vigilancia gubernamental en lo que se refiere a ecología y medio ambiente y a la poca atención a los beneficios económicos que se podrían derivar con el uso de éstos versátiles compuestos químicos .

Mucha gente utiliza el término "*polielectrolito*" y el término "polímero soluble en agua" como sinónimos, lo cuál se justifica ya que, estrictamente hablando, un polielectrolito es un polímero que cuenta con grupos ionizables con una o más unidades repetidas, mientras que existen muchos polímeros solubles en agua que no tienen grupos ionizables tales como el alcohol polivinílico, homopolímeros de poliacrilamina hidrolizada ó N-óxido de polietileno; sin embargo, la gran mayoría de las poliacrilamidas no iónicas contienen un menor porcentaje de grupos carboxilos como resultado de la hidrólisis de las amidas; por lo que el número de polímeros solubles en agua con grupos no ionizables es pequeño comparado con la gran cantidad de verdaderos polielectrolitos .

La mayoría de las veces se emplea el término polielectrolito a los polímeros solubles en agua; sin embargo existe una clase de polielectrolitos potencialmente importante para el tratamiento de aguas, los cuales no son necesariamente solubles en agua .

Por otra parte, la química de los polímeros utilizados para tratamiento de agua, no se ha ocupado seriamente de los pesos moleculares que se deben manejar . Las patentes y la literatura comercial, se encuentran llenas de referencias en cuanto a peso molecular para cada sistema polimérico, pero sólo en raras ocasiones se menciona el método utilizado para su determinación .

### 3.1 SUSPENSIONES COLOIDALES

La sedimentación se usa para remover partículas suspendidas hasta de 50  $\mu\text{m}$ , lo que depende de su densidad, pero con partículas más pequeñas, que tienen velocidades de sedimentación muy bajas, no es factible utilizar la sedimentación para removerlas .

En la siguiente tabla se puede ver que para las partículas más pequeñas las velocidades de sedimentación son virtualmente inexistentes .

| Tamaño de la partícula<br>( $\mu\text{m}$ ) | Velocidad de sedimentación<br>(m/h) |
|---|-------------------------------------|
| 1000  | $6 \times 10^2$                     |
| 100   | $2 \times 10^1$                     |
| 10  | $3 \times 10^{-1}$                  |
| 1   | $3 \times 10^{-3}$                  |
| 0.1   | $1 \times 10^{-5}$                  |
| 0.01  | $2 \times 10^{-7}$                  |

**TABLA 4** *Velocidades de Sedimentación para partículas de P.E. 2.65 en agua a 10°C .(Tebbutt T.H., 1994)*

Si se logra aglomerar las partículas coloidales, finalmente aumentan de tamaño hasta un punto tal que hace posible su remoción por sedimentación .

En un líquido en reposo, hay colisiones entre las partículas finas debido al movimiento browniano y también cuándo los sólidos que se sedimentan más rápido rebasan a partículas cuya sedimentación es más lenta . El resultado es que se producen partículas más grandes y menores en número ; sin embargo el crecimiento por éstos medios es lento . Se puede mejorar la colisión entre partículas por medio de un agitado suave, que puede ser suficiente para producir sólidos sedimentables a partir de una alta concentración de partículas coloidales .

Con bajas concentraciones de coloides se agrega un coagulante para producir partículas de flóculo abultadas que se entretajan con los sólidos coloidales . **(Tebbutt T.H., 1994)**

### 3.2 COAGULACIÓN

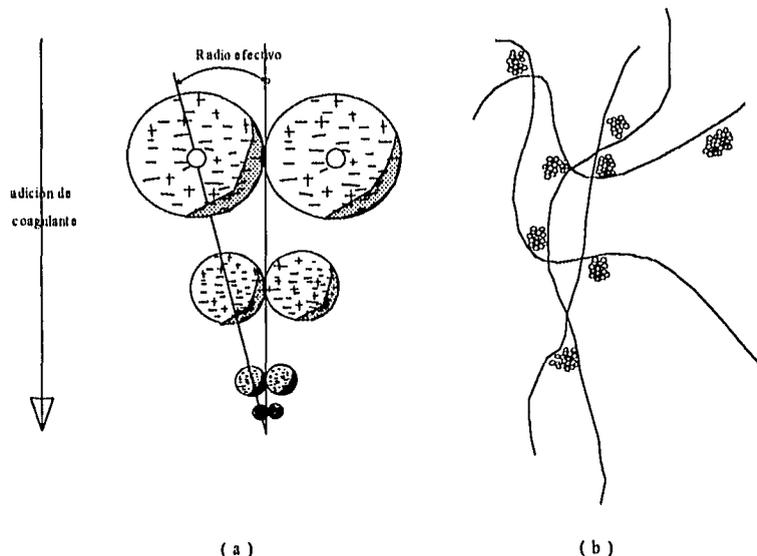
En algunos casos particularmente en el pasado, la floculación y la coagulación eran usadas como sinónimos (J. Bratby,1980, F.N. Kemmer,ed.,Nalco Water Treatment Handbook, 1988) pero en trabajos más recientes se ha encontrado que éstos términos son diferentes .

La **Coagulación** es un proceso en el cuál las fuerzas atractivas de los sólidos en suspensión son neutralizadas y por consiguiente éstos son desestabilizados, en cambio la **floculación** es el proceso mediante el cuál los sólidos suspendidos son agrupados para formar grandes agregados . (C.R. James and C.R.O'Melia,1982, . Weber,Jr; Physicochemical Process for Water Quality Control,1988) . Otros autores han utilizado éstos conceptos para distinguir la agregación causada por los simples iones (coagulación) y los polímeros (floculación) (J.Lyklema,1978, J.A. Kitchener,1972) . Mucha de la confusión en la terminología se dá porque muchos desestabilizadores químicos y sólidos suspendidos son agregados al mismo tiempo en el proceso y no permiten una clara distinción experimental entre estos dos procesos .

Con la floculación de suspensiones coloidales diluídas sólo se tienen colisiones esporádicas y la aglomeración no ocurre en grado importante . En tales circunstancias, la clarificación se logra de una mejor manera con la coagulación química seguida por la floculación y sedimentación . Antes de que la floculación pueda efectuarse, es esencial dispersar el coagulante, cuya dosis normal es de 30 a 100 mg/L en el seno del agua . Esto se lleva a cabo en una cámara de mezclado rápido con una turbina de alta velocidad o agregando el coagulante en un punto de turbulencia hidráulica .

El **coagulante** es una sal metálica que reacciona con la alcalinidad del agua para producir un flóculo insoluble de hidróxido de metal que incorpore a las partículas coloidales .

Mediante la floculación de esta fina precipitación se producen sólidos sedimentables.



**Fig.(2)**

(a) *Coagulación* : La adición de un coagulante neutraliza las cargas, colapsando la "nube" rodeando a los coloides por lo cuál pueden ser aglomerados .

(b) *Floculación* : El enlace de un floculante químico entre las partículas coloidales aglomeradas forman grandes flóculos estables .

(F.N. Kemmer,ed.,Nalco Water Treatment Handbook,1988)

### 3.3 FLOCULACIÓN

El proceso de floculación es una agregación de pequeñas partículas, comunmente en medio líquido, dentro de grandes masas llamadas floculos .

La **floculación** se define como el proceso en el que se produce la desestabilización de partículas y la aglomeración en varios agregados, el resultado neto de la floculación es el agregado de partículas en grandes grupos o floculos .

El minúsculo tamaño de las partículas suspendidas ó coloides impiden la separación de los sólidos y líquidos, resultando un tiempo excesivamente largo de sedimentación y filtración ; incrementando el tamaño de partícula por floculación se disminuye ésta dificultad .

#### **Floculación Natural del agua residual**

El agua residual contiene gran cantidad de material coloidal suspendido o por sólidos dispersos que no sedimentan con facilidad lo cuál provoca turbiedad .

De acuerdo a estudios realizados, se tienen remociones de sólidos suspendidos por coagulación natural del 40 al 60%, cuando se usa el tratamiento primario avanzado utilizando un lecho fluidificado la remoción de sólidos es del 95% (Fettig J.,et.al.,1990) . Para obtener una aglomeración más eficiente, basta añadir suficiente energía, mediante la agitación .

#### **OBJETIVOS DE LA FLOCULACIÓN :**

- Causar una rápida separación o drenaje de la fase líquida de los sólidos suspendidos .
- Minimizar los sólidos remanentes en la fase líquida .

Para que la floculación se lleve a cabo, los llamados floculantes químicos o coagulantes son introducidos a la suspensión de sólidos, la mayoría de éstos compuestos químicos son polimeros solubles en agua (O'Melia,1982, J. Bratby,1980, Kemmer, **Nalco Water Treatment Handbook,1988**) .

La principal aplicación práctica de la floculación es en el tratamiento y clarificación de agua, remoción de lodos, en procesos de remoción de metales y en la industria papelera .

#### **FLOCULANTES**

Los **Floculantes Inorgánicos** son frecuentemente llamados coagulantes, se basan en sales hidrolizables como son las de Aluminio, Hierro y Calcio, principalmente el Sulfato de aluminio, Cloruro férrico e Hidróxido de calcio (J. Gregory,1983) .

Los floculantes poliméricos sintéticos se introdujeron en 1950 y han reemplazado a los floculantes inorgánicos en muchas de las aplicaciones excepto en la clarificación de agua en donde el  $Al_2(SO_4)_3$  sigue siendo el más utilizado .

### 3.3.1 Criterios para una mayor eficiencia en el Mecanismo de Floculación .

El agitado del agua por mezclado hidráulico o mecánico causa gradientes de velocidad cuya intensidad controla el grado de floculación producida . El número de colisiones entre partículas está relacionado directamente con el gradiente de velocidad y es posible determinar la potencia que se requiere para dar un grado particular de floculación como se especifica por el gradiente de velocidad .

Si consideramos un elemento de fluido que experimenta la floculación, el elemento estará sujeto a un esfuerzo cortante y así la potencia recibida es :

$$P = \tau \Delta x \Delta y \Delta z dv / dy \quad (1)$$

donde  $\tau$  = esfuerzo cortante.

$$\begin{aligned} \text{Potencia por unidad de volumen } P &= \tau (\Delta x \Delta y \Delta z / \Delta x \Delta y \Delta z) dv / dy \\ &= \tau dv / dy \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{donde por definición } \tau = \mu dv / dy \quad (3)$$

donde  $\mu$  = viscosidad absoluta.

$$\text{así } P = \mu dv/dy * dv/dy = \mu (dv/dy)^2 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{Si } G &= dv/dy \\ P &= \mu G^2 \end{aligned} \quad (5)$$

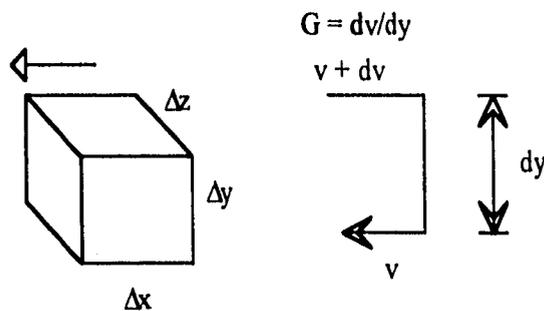


Fig.3 Partícula de fluido que experimenta la floculación (T.H. Tebbutt.,1994)

$$\text{Para la turbulencia hidráulica en un tanque con mamparas } P = \rho g h / t \quad (6)$$

dónde  $\rho$  es la densidad de masa del fluido, h es pérdida de carga en el tanque, t es el tiempo de retención del tanque

$$\text{Ahora de (5) } P = \mu G^2$$

$$G = \sqrt{P / \mu} = G = \sqrt{\rho g h / \mu t} = \sqrt{g h / \nu t} \quad (7)$$

$$\text{En el caso de un tanque agitado mecánicamente } P = D v / V \quad (8)$$

donde D es la fuerza de arrastre en las paletas, v es la velocidad de las paletas relativa al fluido (normalmente cerca de tres cuartos de la velocidad de la paleta), V es el volumen del tanque (en éste caso volumen de las jarras = 1litro) .

$$\text{De la ecuación } D = C_D A \rho (v^2 / 2) \quad (9)$$

$$\text{Así } P = C_D A \rho v^3 / 2 V \quad (10)$$

$$\text{Si se sustituye para P de } P = \mu G^2$$

$$G^2 = C_D A \rho v^3 / 2 V \quad (11)$$

$$\text{ésto es } G = \sqrt{C_D A v^3 / 2 v V} \quad (12)$$

Para una buena floculación, G deberá estar entre los valores de 20 a 70 s<sup>-1</sup>, en éste caso se usó 30 s<sup>-1</sup> . Con valores más bajos la floculación es inadecuada y con valores más altos las partículas de flóculo tienden a fragmentarse . El tiempo de retención normal en los tanques de floculación es de 30 a 45 min. Para la floculación mecánica la profundidad del tanque es equivalente a 1 ½ ó 2 diámetros de paleta y el area de las paletas es de 10 al 25% del área transversal del tanque . (T.H. Tebbutt.,1994, John R . Bratby, 1981) .

Los floculadores mecánicos permiten tener más control sobre el proceso que los floculadores hidráulicos pero requieren más mantenimiento . La floculación y la sedimentación se pueden combinar en una sola unidad .

## Neutralización de carga .

La floculación a través de la neutralización de cargas puede entenderse muy facilmente examinando las características que le dan la estabilidad por las partículas de tamaño submicroscópico hasta el punto en que puedan ser separadas como entidades suspendidas en el líquido . El movimiento browniano impide la sedimentación de las partículas mientras las repulsiones electrostáticas de las cargas superficiales impiden el choque y la agregación .

Estas cargas superficiales pueden venir de adsorción selectiva de iones de la solución, ionización de grupos superficiales tales como SiOH de la sílice e imperfecciones de la red cristalina tales como sustitución de Al por Si en la sílice .

La estructura de cargas que rodea a la partícula se llama la doble capa eléctrica, por conveniencia se dividen en la **capa de Stern** y en la **capa de Gouy-Chapman (J.O'M Bockris,1970 ; L.R. Faulkner et.al.,1980)** . La primera es la capa inicial de iones y moléculas adsorbidas localizadas en la superficie de la partícula . La carga presentada hacia la solución en la capa de Stern naturalmente atrae una capa difusa de iones libres con una carga neta opuesta , ésto es la capa de Gouy-Chapman .

Para que las partículas estén en contacto y se agreguen, debe sobrepasarse el potencial en la capa de Stern . Por lo tanto éste potencial es de interés al determinar la estabilidad de las partículas .Los potenciales de la doble capa no pueden medirse experimentalmente ; sin embargo el **potencial Zeta** definido como el potencial en el plano de corte, puede determinarse y se utiliza para aproximar el potencial de Stern .(Eckenfelder W., 1989)

A partir del tratamiento de la doble capa eléctrica se desarrollo la teoría de la estabilidad de coloides (J. Bratby,1980) DLBO (Derjaguin, Landau, Berwey, Overbeek) en éste tratamiento la energía total de las interacciones de la partícula coloidal está dada por la suma de las energías atractivas (Van Der Waals) y repulsivas (de interacciones electrostáticas).

La energía total de interacción puede determinarse como una función de la distancia que separa los centros de las partículas coloidales a distancias mayores que el espesor de la doble capa eléctrica (aprox.  $1/K$  donde  $K$  es la distancia de Debye-Huckel), predomina el término de repulsión electrostática y con una mayor aproximación predominan las fuerzas atractivas de bajo alcance tales como el enlace de hidrógeno o las fuerzas de Van Der Waals, a distancias intermedias la energía total de interacción es una función de ambos términos, atractivo y repulsivo . La magnitud de esos términos a esas distancias determinan la altura de la barrera de la energía potencial . Si el máximo de la altura de la energía potencial es grande relativo a la energía cinética de las partículas, el sistema es estable .

El tratamiento DLBO dá un resultado interesante cuándo se utiliza para obtener una expresión para la concentración de un electrolito indiferente que se requiera para desestabilizar la suspensión . Esta observación se conoce como la *regla de Schulze-Hardy*, a pesar de su aplicabilidad general se restringe a sistemas donde el floculante no esté adsorbido sobre la superficie del coloide, a pesar de ésto da una buena ilustración del aumento de la actividad que se esperaría mientras aumenta la carga de los iones .

Para provocar que las partículas floculen en una dispersión estable, es necesario darle suficiente energía cinética para sobrepasar la barrera de energía potencial . Alternativamente, la barrera puede eliminarse por neutralización de cargas superficiales . Esto se puede llevar a cabo ya sea por compresión de la doble capa o adsorción del floculante sobre la superficie de las partículas .

La carga es neutralizada por compresión de la doble capa cuando la floculación se efectúa a través de un aumento en la fuerza iónica de la solución . A partir del modelo de Gouy-Chapman de la doble capa eléctrica se deriva una expresión para la longitud de **Debye-Huckel** .

$$K = \left( \frac{4 \times 10^{-3} e^2 N I}{\epsilon K_B T} \right)^{1/2} \quad (13)$$

Donde  $e$  es la carga de un electrón,  $N$  el no.de Avogadro,  $I$  la fuerza iónica  $\epsilon$  la permitividad eléctrica del disolvente,  $K_B$  la constante de Boltzman y  $T$  la temperatura absoluta .

Ya que el espesor de la doble capa es aproximadamente  $1/K$ , al aumentar la fuerza iónica, disminuye este espesor . La compresión permite a las partículas coloidales aproximarse de tal manera que las fuerzas atractivas de corto alcance predominan sobre las fuerzas electrostáticas repulsivas . Consistentes con éste mecanismo son las observaciones de que las sales no hidrolizables como NaCl pueden flocular suspensiones estables . La concentración óptima de floculante es independiente de la concentración de sólidos suspendidos y no ocurren una sobredosis o reestabilización de los sólidos (J. Bratby,1980) .

En la presencia de metales hidrolizables como  $Al^{3+}$  y  $Fe^{3+}$  o polielectrolitos de signo opuesto al coloide, la carga se neutraliza por la adsorción de éstas especies sobre la superficie de la partícula . A pH suficientemente alto para la hidrólisis, las especies cargadas e

hidrolizadas de  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  y  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  neutralizan la carga superficial de la partícula por la adsorción, como se indica por la carga inversa del potencial zeta . Se obtuvo evidencia adicional de la adsorción de  $\text{Al}^{3+}$  hidrolizado en experimentos utilizando soluciones añejadas de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  como floculante . Se dejaron reposar por 24 h a  $90^\circ\text{C}$ , soluciones diluidas de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  condiciones que favorecen la hidrólisis . Estas soluciones añejadas probaron ser floculantes más activos y menos sensibles al pH que la floculación con  $\text{Al}^{3+}$ . (E.Matijevic,1966)

Cuando la floculación se efectúa con polielectrolitos con carga opuesta a la de las partículas la carga puede ser neutralizada por adsorción de polielectrolito . Sin embargo, éste proceso puede ser mejor explicado por un mecanismo de regiones de carga .

Como base de la neutralización de carga la comparación de las medidas del potencial zeta con resultados de floculación se encontró que la floculación óptima ocurría en el punto de neutralización total de la carga . En una de esas investigaciones un poli(Cloruro de trimetil amino etilo) de peso molecular medio, floculó una suspensión de 0.5 mg/L de sílice . (L.S.Sandell,1964)

En otras investigaciones se utilizaron polímeros de relativamente bajo peso molecular ; con éstos polímeros puede elucidarse la presencia simultánea de la floculación óptima y la neutralización de carga ya que en éstos sistemas se minimizan los fenómenos de enlazamiento .

Sin embargo, la observación del potencial zeta cero en la floculación óptima no se esperaría a primera vista ya que la floculación con polímeros de alto peso molecular tiende a favorecer el enlazamiento . Puede encontrarse una explicación a éstos resultados en la concentración de los sólidos suspendidos .

En suspensiones muy diluidas como (0.5 mg/L) el polímero puede tener el tiempo adecuado para llegar a adsorberse y alcanzar una configuración de equilibrio antes de que puedan ocurrir suficientes choques para que el enlazamiento llegue a ser importante . Con aumento en el peso molecular el potencial zeta en la floculación óptima llega a ser más negativo, esto ocurre porque el aumento en el peso molecular del floculante favorece el enlazamiento con respecto a la floculación por neutralización de carga .

Como un ejemplo de éste comportamiento (A.M.Kragh & Langston,1962) ; se observó una buena floculación de sílice con gelatina cargada positivamente a un potencial zeta de 35 mV .

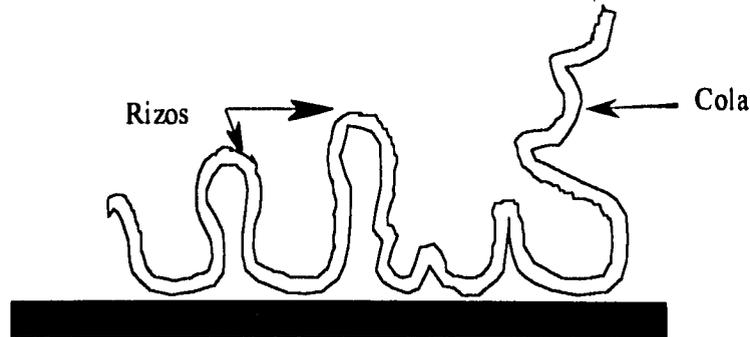
En cualquier sistema, cuando se efectúa la floculación con la adición de electrolito o polielectrolito cargado de forma opuesta, es probable que ocurra a un grado de neutralización de carga, la cantidad de neutralización depende de las características del sistema .

## **Floculación por enlazamiento**

El *enlazamiento* como un mecanismo de floculación se postuló inicialmente para explicar la fuerza inusual del floculo formado por Polimetacrilato de sodio comparado con el formado con un polielectrolito simple, el NaCl . El modelo se caracteriza por la unión de relativamente pocos segmentos del polímero sobre la superficie de la partícula coloidal con segmentos no unidos hacia el seno de la solución . Esta extensión aumenta el diámetro de colisión de

partículas y dan un punto de enlace más allá de las fuerzas electrostáticas repulsivas . Una extensión de polímero suficientemente larga desde los puntos de enlace y de los sitios de adsorción vacíos con el punto de colisión son necesarios para que ocurra un enlazamiento .

A pesar de que éste mecanismo se aplica a sistemas de polímeros orgánicos de alto peso molecular, especies inorgánicas particularmente aquellas capaces de formar polímeros pueden efectuar también la floculación a través de un mecanismo de enlazamiento .



**Fig.4** Distribución de los fragmentos de polímero (ondulaciones, terminaciones y cuerpo) (K.J.Ives,1978)

En la floculación de arcillas por dos poliácridamidas de alto peso molecular con diferentes grados de hidrólisis, el polímero de peso molecular más alto hidrolizado al 30% observó un mejor rendimiento . Se observó una concentración óptima sobre la cuál la floculación disminuyó . Estos resultados pueden ser interpretados fácilmente en términos de un mecanismo (E.Matijevic,et.al.,1961) de enlazamiento . El polímero de mayor peso molecular puede adsorber en configuraciones con ondulaciones de mayor longitud que se extienden desde la superficie de la partícula, aumentando la probabilidad de colisiones . El polímero hidrolizado al 30% enlaza a las partículas de mejor forma porque la carga no afecta solo a las interacciones partícula-polímero sino que también causa un alargamiento de la cadena del polímero solvatado . Con 30% de hidrólisis se alcanza un balance entre los efectos de las fuerzas repulsivas de carga del polímero, la superficie de la partícula y las configuraciones de la solución del polímero mientras está influenciado por la presencia de grupos acrilato cargados . Los efectos de concentración se deben a la necesidad de sitios vacíos sobre la superficie, en los cuáles el polímero de enlace pueda unirse . A concentraciones abajo del óptimo, el enlace es insuficiente para efectuar la floculación mientras que a concentraciones arriba del óptimo la saturación de la superficie es tan alta por las colisiones que los sitios superficiales vacíos disponibles son insuficientes para el enlace .

Para predecir la velocidad de filtración (Luttinger L.B.,1981) a partir de la concentración inicial del polímero, se desarrolló un modelo basándose en la adsorción de polímeros seguidos de la formación de agregados, (floculación) . Se supuso que la adsorción era del tipo Langmuir

$$\theta = \frac{b P}{1 + bP} \quad (14)$$

donde  $\theta$  es la magnitud de superficie de polímero,  $P$  es la concentración de polímero en equilibrio y  $b$  es una constante . La concentración de polímero en cualquier momento se relacionó con la concentración de polímero antes de que ocurriera cualquier adsorción .

$$P = P_0 - k' w \theta \quad (15)$$

donde  $k'$  es una constante y  $w$  la concentración de sólidos . Usando ésta y las expresiones para la velocidad de formación de flóculo .

$$\frac{-dN_0}{dt} = k_1 N_0^2 \theta (1 - \theta) \quad (16)$$

donde  $N_0$  es el número de partículas primarias y  $k_1$  una constante de velocidad, la velocidad de desintegración del flóculo .

$$\frac{dN_0}{dt} = \frac{k_2 R}{\theta (1 - \theta)} \quad (17)$$

$k_2$  es una constante de velocidad y  $R$  el radio de una esfera que se aproxima al tamaño del flóculo . El modelo se desarrolló relacionando la velocidad de filtración con la concentración inicial del polímero . Más tarde éste modelo se modificó tomando en cuenta la fracción de segmentos realmente unidos a la partícula, y la Ec. 6 se reemplazó por

$$P = P_0 - k' \theta / \beta \quad (18)$$

Donde cada variable tiene el mismo significado que antes y  $\beta$  representa el no. de segmentos adsorbidos .

Si se considera la floculación como una reacción bimolecular, los términos  $\theta$  y  $(1-\theta)$  pueden tomarse como similares a los términos de concentración en una expresión cinética normal . Así,  $\theta$  representa la fracción de superficie cubierta y  $(1-\theta)$  la superficie libre de polímero . Este desarrollo es consistente con el mecanismo de enlazamiento . Esto demostró la necesidad de suficientes uniones de polímero para formar los enlaces y simultáneamente suficientes sitios sobre los cuales puedan resultar las uniones . De acuerdo a esto, se sugirió que para el enlazamiento, ocurre una floculación óptima con un 50% (V.K.La Mer,1956) de cobertura de la superficie .

A pesar de que esta teoría estaba de acuerdo con resultados experimentales (J.O'M Bockris,1970), otros investigadores encontraron inconsistencias al tratar sus datos con éste modelo . En la teoría de la filtración (V.K.La Mer & R.H. Smellie,1956) se hacen las siguientes suposiciones : el tamaño del flóculo es el mismo en la superficie del filtro y en la suspensión agitada, la altura de la plasta del filtro es independiente de la filtración y una permeabilidad óptima refleja una floculación óptima . La altura del filtro depende de la concentración, la permeabilidad óptima y la velocidad óptima de la sedimentación ya que el tamaño de partículas no puede ser la misma en la suspensión agitada que en la plasta del filtro .

A pesar de que éstos resultados no dieron soporte a la teoría predictiva, varias observaciones fueron consistentes con la teoría de enlace de la floculación , incluyendo una formación de flóculo más fuerte y el deterioro de la floculación con un aumento en la concentración del polímero . (R.W.Slater & J.A. Kitchener, 1965) .

En un estudio se encontró que se requería 1 mg de floculante/gr de sólidos para llevar a cabo una máxima claridad de sobrenadante; sin embargo, se observaron velocidades de sedimentación máxima a 4 mg de floculante / gr de sólidos .(R.M.Schlauch,1981) .

De un trabajo con suspensiones minerales y gelatina, se encontró más evidencia para la floculación por enlace (Langston,1962) . A pesar de que la gelatina adsorbida aumentaba con la agitación, la floculación después de un rápido aumento inicial disminuía . Esto resultaba debido a que después de una agitación continuada, el contacto polímero-partícula llega a ser muy difícil permitiendo que el polímero libre se adsorba sobre una sola partícula disminuyendo las uniones al reducir el no. de sitios disponibles . Junto con éstas observaciones estaban los resultados que mostraron que la floculación de sílice coloidal podría impedirse al agregar hexametilenglicol (O.Griot & J.A. Kitchener,1965) . Aquí el glicol, un enlazante de hidrógeno más fuerte que la poliacrilamida, se adsorbía preferentemente sobre la sílice reduciendo el número de sitios vacantes para la unión con el polímero .

La evidencia de que se llevó a cabo la floculación por enlace, se comprobó previamente con las concentraciones de sólidos suspendidos de 0.5 a 5% . En éste tipo de sistemas la cinética es favorable para la formación de enlaces, particularmente si el polímero no está cargado o es de la misma carga que la partícula . Mientras que la concentración de los sólidos suspendidos aumenta, el comportamiento de los polímeros (pesos moleculares  $10^4$ - $10^6$ ) el cuál era idéntico a bajas concentraciones de sólidos suspendidos, comenzó a diferir . La concentración óptima del polímero para la floculación aumenta considerablemente para los polímeros de mayor peso molecular ( $10^6$ ) y para los de menor peso molecular no hay cambio .

A altas concentraciones de sólidos suspendidos se favorece el enlace polímero-partícula, teniendo más alta frecuencia de colisiones, con ésto aumenta la probabilidad de contacto del polímero con más de una partícula antes de que éste tenga la oportunidad de alcanzar la configuración de equilibrio sobre una sola partícula .

## **Mecanismo de Floculación en zonas Electroestáticas**

A pesar de que el mecanismo de enlace funciona bien para dar a entender los efectos de los polímeros no iónicos y aniónicos sobre la floculación de partículas coloidales, la coincidencia con parámetros experimentales es muy pobre considerando la acción de los polímeros catiónicos muy cargados sobre sólidos coloidales cargados negativamente, particularmente para moléculas de bajo peso molecular en soluciones diluidas . La floculación por medio de un mecanismo de enlace aumenta con el peso molecular y las configuraciones del polímero adsorbido, ya que se forman ondulaciones y se extienden a partir de la superficie de la partícula para enlazar las partículas coloidales efectivamente .

Se evaluó el efecto del peso molecular y la carga catiónica sobre la floculación de sílice de diámetro 0.014  $\mu\text{m}$  con polietilenimina ya que el polímero contenía grupos amino primario, secundario y terciario en una relación 1:2:1 , la carga podía ser ajustada por control de pH .

Abajo de pH 9 la concentración de floculación crítica, que es la cantidad de polímero necesaria para iniciar la agregación, era independiente del peso molecular ; sin embargo arriba

de pH 11 dónde el polímero no tenía carga y puede ocurrir el enlazamiento, aumentando el peso molecular disminuye la cantidad de polímero necesario para alcanzar la concentración de floculación crítica .

Es de particular importancia, el determinar que el mecanismo de floculación es la configuración de equilibrio del polímero adsorbido para sistemas con un floculante de alta carga catiónica en una suspensión coloidal aniónica, la alta energía de activación favorece una configuración adsorbida plana, ésta configuración reduce significativamente la formación de curvaturas que pueden enlazar a las partículas suspendidas además, en esta configuración aplanada como en un sistema de latex de poliestireno (J.Gregory,1963), la distancia promedio entre los grupos carboxilo hidrolizados es de aproximadamente 2.5 nm . La distancia entre los grupos amino cuaternarios del polímero adsorbido fué calculada en 0.5 nm . Por lo tanto el polímero llega a adsorberse completamente, limitaciones geométricas impiden la neutralización 1:1 de la carga superficial aniónica . En cambio, se forman zonas positivas por efecto de la floculación por medio de atracciones electrostáticas por la colisión con una región negativa sobre otra partícula .

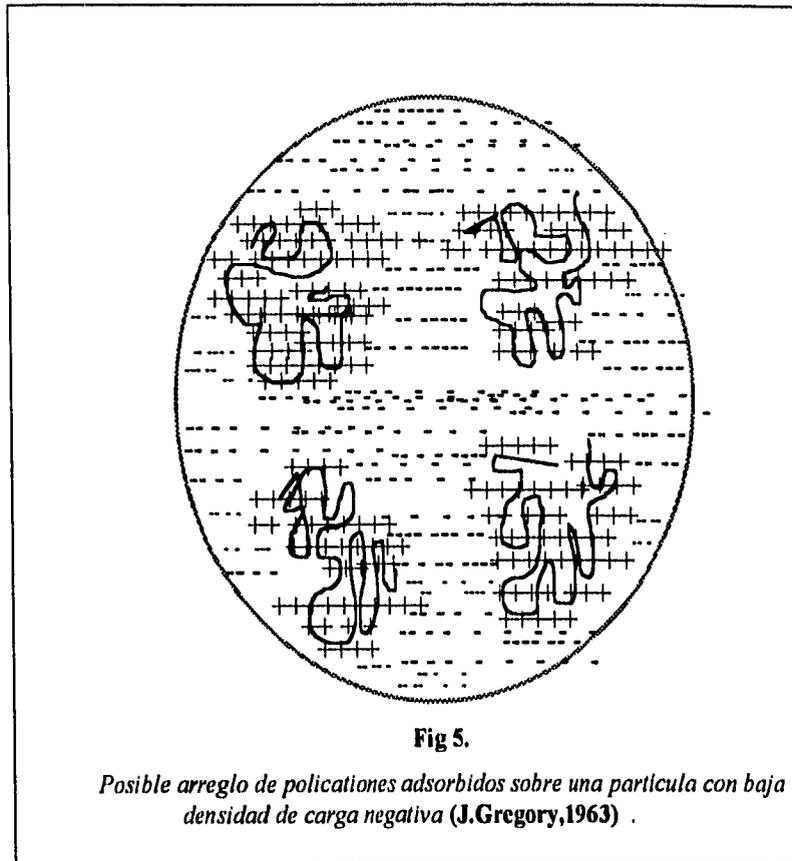
Una relación empírica describe el efecto del peso molecular sobre la adsorción del polímero :

$$C_m = K'' M^n \quad (19)$$

donde  $C_m$  es la cantidad de polímero adsorbido (Peso x Unidad de area) cuando la superficie está saturada,  $K''$  y  $n$  son constantes y  $M$  es el peso molecular . Para sistemas donde el polímero se adsorbe en una configuración aplanada el no. de moléculas de polímero disminuye mientras  $M$  aumenta . Sin embargo si se trata de pesos la cantidad es independiente de  $M$  ; por lo tanto  $n$  debería ser igual a cero . Por otra parte si el polímero se une en una sola posición , el no. de moléculas adsorbidas sería independiente de  $M$  y el peso adsorbido total aumentaría con  $M$ , es decir  $n$  sería igual a 1 .

En sistemas caracterizados por alta carga catiónica sobre el floculante y los sólidos aniónicos coloidales, especialmente a baja concentración de partículas, debe predominar el mecanismo de regiones electrostáticas (Penniman J.G,1981) .

Sin embargo incluso en tales sistemas puede ocurrir el enlazamiento si la concentración de partículas es suficientemente alta para que las colisiones se lleven a cabo en una escala de tiempos similar a la requerida para que el polímero tome su configuración aplanada . El mecanismo que controla la floculación está dirigida entonces por el sistema y el floculante .



## Mecanismo de arrastre de floculante

Después de la adición al agua los floculantes como alúmina y cloruro férrico se hidrolizan . Las especies hidrolizadas incluyen productos solubles (como  $\text{AlOH}^{2+}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ ) e insolubles ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) .Las especies solubles efectúan por adsorción sobre la superficie coloidal que neutraliza la carga superficial . Si el pH es suficientemente alto de tal manera de que se formen precipitados hidróxido, los sólidos coloidales pueden reticular como agregados de éstas partículas y las características del flóculo llegan a ser indistinguibles de las de éstos precipitados hidróxido . A ésto se le llama el mecanismo de arrastre del flóculo . El proceso se relaciona con la precipitación de hidroxidos, una máxima precipitación de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  coincide con el pH de floculación óptima de suspensiones de gel por  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$  .(R.M.Schlauch,1981)

Este mecanismo está más asociado con la floculación por sales inorgánicas . Es posible sin embargo que bajo condiciones donde los floculantes poliméricos puedan hacerse precipitar ocurra un arrastre del flóculo . Además algunos floculantes orgánicos como anilina-formaldehído y melamina-formaldehído, pueden funcionar ya que precipitan al pH de aplicación .

### 3.3.2 Cinética de floculación .

La cinética de la floculación de polímeros depende de varios procesos físicos . Por la adición de un floculante, el polímero debe distribuirse a través de todo el sistema y adsorberse sobre las partículas coloidales y las partículas con polímero adsorbido deben chocar para que ocurra agregación . Los choques que resultan del simple movimiento browniano se llama **Floculación pericinéctica** mientras que la **Floculación ortocinéctica** resulta cuando la agregación se promueve por gradientes de velocidad inducidos externamente . (Penniman J.G.,1981)

Por definición antes de que pueda ocurrir la floculación, deben reducirse las fuerzas repulsivas causadas por las interacciones de la doble capa permitiendo a las partículas chocar (lo que se logra con el proceso de Coagulación) . Mientras, éstas fuerzas repulsivas son sobrepasadas hasta que se lleva acabo la agregación después de cada colisión y resulta una rápida floculación . Si existe la suficiente carga superficial, las partículas se repelen al aproximarse a menos que tengan suficiente energía cinética para sobrepasar la barrera de energía potencial, a ésto se le llama floculación lenta .

### 3.3.3 Efectos físicos

La velocidad de alcance y el mecanismo de la floculación, son afectados por las partículas, los floculantes y la solución .

#### **Propiedades de la partícula :**

##### **Concentración :**

La concentración de partículas puede variar desde 50 mg/L en sistemas de agua hasta 10 - 20% en suspensión en minerales en la industria de la minería .

El efecto de una concentración de partículas arriba de 150 mg/L de kaolinita y montmorillonita se estudió con poliacrilamida de alto peso molecular ; se encontró una relación estequiométrica entre la concentración de gel inicial y la concentración de polímero óptima para floculación y la zona de desestabilización se ampliaba con un aumento en la concentración .

Al examinar los cocientes en peso de saturación de polímero adsorbido se encontró una relación inversa entre el polímero adsorbido y la concentración inicial del gel . Esto es consistente con un mecanismo enlazante donde un aumento en la concentración favorece a más choques, cuando el enlazamiento llega a ser más importante se requiere menos polímero para la floculación . A concentraciones arriba de 2% de sólidos, la relación entre concentración óptima y floculación es lineal . Bajo ésta concentración, la suspensión llega a ser significativamente más difícil de flocular .

En sistemas donde el enlazamiento predomina (W.P.Shyluk & R.W.Smith,1969), la concentración de sólidos varía de 0.4 a 20 %, mientras el mecanismo de regiones electrostáticas se favorece, las concentraciones son menores al 1%, a pesar de que en sistemas con concentraciones de 1.4% resultaron consistentes con el modelo de zonas electrostáticas .

No puede obtenerse una conclusión definitiva a partir de éstos resultados, por lo general, la mayor concentración de sólidos(mayor de 1%), aumenta la velocidad de choques lo que favorece la floculación por enlazamiento ; sólidos en menos concentraciones tienen menos frecuencia de choques . El polímero por lo tanto tiene más tiempo para alcanzar una configuración de equilibrio aplanada que favorece el mecanismo de enlazamiento .

### **Tamaño :**

La importancia de las variaciones del tamaño de partículas respecto a la floculación ha sido investigado pero no bien entendido . Usando gel de caolín de 0.09- 9.8  $\mu\text{m}$ , la relación entre peso molecular y tamaño de la partícula se estudió utilizando poli(cloruro de dialil dimetil amonio) . Se observó un peso molecular óptimo en  $3.5 \times 10^4$  con la muestra de 0.09  $\mu\text{m}$  ; con caolín de 0.7  $\mu\text{m}$  la actividad mejoró al aumentar el peso molecular a en  $3.5 \times 10^4$ , después de lo cuál en  $1.3 \times 10^5$  la actividad no se ve afectada .

La floculación de una muestra de 9.8  $\mu\text{m}$  mostró un aumento creciente en la actividad al aumentar el peso molecular . Se observó una relación inversa (A.P.Black, and M.R. Vilaret,1969) entre la cantidad de polímero requerido para la floculación y el tamaño de partícula .

Además al utilizar soluciones de sílice con tamaños de 0.004 a 0.22  $\mu\text{m}$  para partículas menores de 0.04  $\mu\text{m}$ , la cantidad de polímero necesitado para la floculación varió inversamente con el tamaño de la partícula . Para sílice con tamaño de partícula mayor varió inversamente con el cuadrado del diámetro .

## CAPITULO IV

---

### USO DE COAGULANTES EN EL TRATAMIENTO DE AGUA

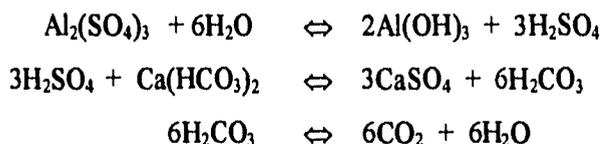
#### 4.1 TIPOS DE COAGULANTES

Los coagulantes que se utilizan con frecuencia para el tratamiento de agua son :

- Los que contienen aluminio como son ; el sulfato de aluminio, el aluminato de sodio, la alúmina, cloruro de aluminio y polímeros de aluminio .
- Los que contienen hierro, como son el cloruro férrico, el sulfato ferroso y el sulfato férrico .
- Los que contienen calcio, como son el Hidróxido de Calcio y la cal viva .

##### 4.1.1 Sulfato de Aluminio

El Sulfato de Aluminio o alumbre  $Al_2(SO_4)_3$  es el coagulante más popular para el tratamiento de agua y las reacciones complejas que tienen lugar después de su adición al agua se simplifican como :



Esto es en general :



Cuándo se usa alumbre comercial se tiene que :

1 mg/L de alumbre destruye 0.5 mg/L de alcalinidad

Produce 0.44 mg/L de bióxido de carbono

(Ambos como  $CaCO_3$ )

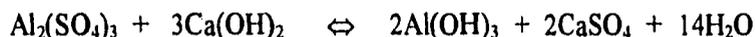
Así para una coagulación satisfactoria debe haber suficiente alcalinidad que reaccione con el alumbre (T.H. Tebbutt.,1994) . La solubilidad del  $Al(OH)_3$  depende del pH, que

es baja entre un pH de 5 y 7.5; fuera de éstos límites la coagulación con sales de aluminio no tiene éxito . Existen otros coagulantes que algunas veces se usan con sulfato ferroso, como  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (caparrosa) .

El  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  se presenta en forma sólida en forma de pequeños cristales amorfos de color blanco y en forma líquida que es más fácil de manejar para tratamiento de agua .

Cuando las sales de aluminio se adicionan al agua ocurren muchas reacciones por hidrólisis, también pueden producirse moléculas neutras o cargadas negativamente .

Por otra parte, es necesario considerar que las sales de aluminio reaccionan con compuestos que comunmente se hayan en el agua de acuerdo con :



#### 4.1.2 Cloruro Férrico

El **cloruro férrico**  $\text{FeCl}_3$  se presenta en forma sólida y en solución al 40% que es como se utiliza comúnmente ya que en forma sólida es higroscópico .

El cloruro férrico forma un coágulo más pesado y por lo tanto; de mayor velocidad de sedimentación, por lo que se obtienen resultados eficientes en un amplio rango de pH .

De acuerdo a la bibliografía consultada (Ooten R.J,1993) el  $\text{FeCl}_3$  es el coagulante más eficiente para uso en el tratamiento de aguas residuales domésticas ya que su comportamiento se adapta a un rango de pH más amplio, es decir, tanto a bajos, como a altos pH .

La caparrosa alguna vez se trata con cloro para dar una mezcla de sulfato férrico  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  y  $\text{FeCl}_3$  que se conoce como caparrosa clorada . Las sales férricas dan coagulación satisfactoria arriba de un pH de 4.5, pero las sales ferrosas sólo son adecuadas para un pH de 9.5 . Las sales de hierro son más baratas que el alumbre pero a no ser que la precipitación sea completa, el hierro residual en solución puede causar problemas debido principalmente a su propiedad de producir manchas en las máquinas lavadoras .

Con concentraciones muy bajas de materia coloidal, la formación del floculo es difícil y se pueden requerir ayudas de coagulante (co-coagulantes) . Estos pueden ser simples aditivos como partículas de arcilla que forman núcleos por precipitación del hidróxido o polielectrolitos . Debido a la naturaleza esponjosa del floculo, éstas tienen un area superficial muy grande y son capaces de la adsorción de la materia orgánica en solución (T.H. Tebbutt,1994 & Vorchheimer,1981) .

El sulfato férrico  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  es un polvo blanco soluble en agua que se hidroliza con formación de ácido sulfúrico por lo que deben prevenirse los efectos de acidez .

El sulfato ferroso  $\text{FeSO}_4$  es un polvo de color verde, soluble en agua, reacciona con la alcalinidad natural del agua y con otros compuestos alcalinos para formar hidróxido ferroso,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  .

#### **4.1.3 Hidróxido de Calcio (cal)**

La cal no es un coagulante verdadero ya que su eficiencia se debe a la reacción con bicarbonatos para precipitar carbonato de calcio o con los ortofosfatos para precipitar hidroapatita cálcica .

Los lodos resultantes pueden ser fácilmente espesados, deshidratados y calcinados para convertir el carbonato de calcio nuevamente en cal para ser reusada .

La presencia de aniones en solución afecta la eficiencia de la coagulación . Los sulfatos favorecen la acidez pero destruyen la alcalinidad, los cloruros incrementan el intervalo de acción .

La cal es un producto de fácil manejo y además barato, por lo que se emplea con frecuencia en el tratamiento de agua .

A pesar de que la cal y el sulfato de aluminio son los mejores coagulantes en cuanto a que son coagulantes capaces de remover con mayor eficiencia turbiedad y Sólidos Disueltos Totales ; su desventaja consiste en elevar el pH hasta valores cercanos a 9.5, que es superior a lo recomendado por la NOM-CCA-032-ECOL/93 (pH=8.5), por lo que su aplicación se limita a la posibilidad de desarrollar un método de corrección del pH .

#### **La cal hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se emplea en :**

**PELETERIA** : Tiene la capacidad de suavizar la piel hidratando el colágeno . También asiste en el quitado de pelo .

**INDUSTRIA DEL PAPEL** : Se usa para:

Fabricación del licor cáustico que digiere la celulosa

Para hacer el licor decolorizador , con cloro .

Para preparar el blanco satín con que se terminan papeles finos, en combinación con sulfato de aluminio .

Para preparar el carbonato de calcio precipitado, para recubrir el papel blanco .

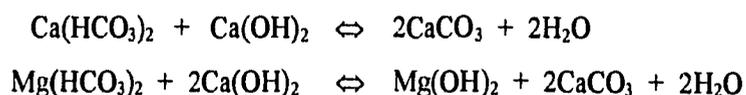
### ESTIRADO DE ALAMBRE :

Actúa como una lechada en la que se aprovecha la cualidad de precipitación lenta, en la que el alambre que ha sido tratado con ácido, es sumergido, después de lavarlo con agua; se seca y la lechada de cal forma una cubierta blanca y delgada, cuando el alambre es estirado a través de rodillos de acero endurecido . Para llegar al diámetro de alambre requerido, en cada paso, es tratado con una sustancia jabonosa, en donde la cal actúa como lubricante y capa refractaria, previniendo que el carbón formado al quemarse el jabón pique el alambre .

### TRATAMIENTO DE AGUA :

La presencia de bicarbonatos solubles de calcio y de magnesio confieren una dureza temporal al agua y son los que se precipitan cuando hervimos el agua, porque se forman carbonatos insolubles . Esta dureza es removida fácilmente con la cal .

Las reacciones que ocurren son las siguientes :



También la dureza permanente es removida con asistencia de cal . Las reacciones que ocurren son :



El cloruro de calcio es fácilmente removido con carbonato de sodio .

### Cal viva, CaO :

En el tratamiento de aguas la cal viva se utiliza en forma de polvo para neutralizar, precipitar y decarbonatar . La causticidad del producto obliga a tomar precauciones especiales para su almacenamiento y su conservación .

Antes de su empleo es necesario "apagarla" por hidratación en un depósito de mezcla y obtener lechada de cal, en donde se produce una reacción exotérmica .

### Características fisicoquímicas de la cal hidratada $\text{Ca(OH)}_2$ utilizada en el tratamiento de agua del Gran Canal .

La marca es QUIMOCAL y su contenido de hidróxido de calcio es de aprox. 94% .

**Densidad específica = 2.2**

**Densidad aparente = 0.5 g/L**

## 4.2 REMOCION DE MICROORGANISMOS .

Se ha demostrado (Fattal B. Puyesky, et.al,1993) que cuándo se utiliza principalmente cal como coagulante, la eliminación de bacterias y virus se ve disminuída, según se demostró en los análisis de remoción de coliformes realizados en el Instituto de Ingeniería .

## 4.3 AYUDA-COAGULANTES .

### 4.3.1 Sílice Activada .

Es un polímero de cadena corta que sirve para unir partículas de aluminio hidratado. En dosis elevadas inhibe la formación del flóculo debido a sus propiedades electro atractoras .

Las dosis comunes son de 5 a 10 mg/L . Se emplea desde 1937, tiene un peso molecular del orden de  $10^4$  y está cargada negativamente . (C.R. James & C.R.O'Melia,1982)

Algunos componentes inorgánicos pueden ser polimerizados en agua para formar polímeros floculantes inorgánicos . La sílice activada (algunas veces identificada como  $\text{SiO}_2$ ) es un ejemplo . Cuando el silicato de sodio, que contiene alcalis, se diluye de 1.5 a 2.0%, éste se neutraliza parcialmente (casi siempre con cloruros o bicarbonato de sodio) . Es entonces cuando la sílice se vuelve coloide y comienza a polimerizar lentamente . Después de 15 o 30 min, la solución es diluída de 0.5 a 1% de  $\text{SiO}_2$  disminuyendo la polimerización al producirse la sílice activada . Sin embargo, este procedimiento de preparación es complicado, éste floculante es muy efectivo en conjunción con un tratamiento con aluminio para remover el color de la materia orgánica .

## CAPITULO V

---

### CARACTERISTICAS QUIMICAS DE LOS POLÍMEROS ORGANICOS

#### 5.1 GENERALIDADES DE LOS POLÍMEROS ORGÁNICOS .

Un polímero es una cadena de pequeñas subunidades llamadas monómeros . Muchos polimeros sintéticos contienen dos o tres tipos de subunidades diferentes . El número total de subunidades de un polímero sintético puede variar, produciéndose materiales de diferente peso molecular . Las cadenas pueden ser lineales o pueden tener varias ramificaciones .

Si una unidad monomérica de un polímero contiene grupos ionizables (ej. carboxilo, amino, grupos sulfónicos), el polímero se llama polielectrolito . Los **polielectrolitos** son polimeros orgánicos sintéticos de alto peso molecular que poseen la característica de tener una alta tendencia a adsorberse en la superficie de partículas en suspensión .

La reacción química que se emplea para multiplicar a los monómeros se denomina *polimerización* . Un polímero que está constituido por el mismo tipo de unidades se denomina homopolímero y aquel que tiene dos o más unidades diferentes se denomina copolímero .

La cantidad y tipo de monómeros que se combinan se deriva de su proceso de fabricación .(Schwoyer, et.al.,1981) . Además su construcción puede ser lineal, ramificada o cruzada, por lo que existen un gran número de polimeros en el mercado . Según el tipo de grupos ionizables de la unidad monomérica, un polielectrólito puede ser catiónico, aniónico o anfóptico (contiene ambos grupos positivo y negativo, ej., proteínas) como es el caso del polielectrolito que se tratará en éste estudio .

## 5.1.1 Polímeros Sintéticos .

### Floculantes poliméricos

Los polímeros floculantes son solubles en agua . Las macromoléculas orgánicas son capaces de desestabilizar y flocular la materia en suspensión .

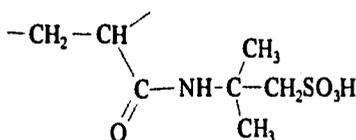
La solubilidad en agua es debida a los grupos funcionales iónicos y no iónicos . Los polímeros solubles en agua pueden ser sintetizados o derivados de las fuentes naturales, (Levine,et.al., 1981) .

En la industria de la pulpa y el papel el consumo de los polímeros naturales es casi dos veces el de los polímeros sintéticos (Garris John P.,1990) . La efectividad de los polímeros naturales es menor que la de los polímeros sintéticos, por lo que para proporcionar el mismo resultado de los polímeros sintéticos, es necesario aplicar dosis más altas .

Más de la mitad de los polímeros floculantes sintéticos y todos aquellos de alto o ultra-alto peso molecular son copolímeros en los cuáles el monómero principal es la acrilamida sólo algunos son homopolímeros (7.4 %) . Estos son preparados fácilmente por polimerización de radicales libres (Letterman & Pero ,1990) .

De los floculantes con base de acrilamida, el 43.8 % son aniónicos . Casi todos éstos son copolímeros de acrilamida y acrilato de sodio . Este copolímero es preparado por hidrólisis parcial de poliacrilamida o por copolimerización directa de los dos monómeros .

A pH bajo, los **acrilatos** son no iónicos y para mantener la carga aniónica se añaden copolímeros de la acrilamida y ácido acrilamido-2 metilpropanosulfónico (AMPS) son requeridos para mantener la carga aniónica .



AMPS

## 5.2 POLIELECTROLITOS EMPLEADOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA

La mayor parte de los polímeros utilizados son de 2 tipos : Coagulantes y Floculantes .

Los coagulantes son moléculas cargadas positivamente y de bajo peso molecular, con tendencia a formar puentes ó cadenas moleculares, que pueden ser lineales o reticuladas .

Las cadenas reticuladas pueden concebirse como el resultado del entrecruzamiento de cadenas lineales mediante enlaces covalentes formando una red espacial . A lo largo de las cadenas moleculares se reconocen agrupaciones atómicas características, entre los que se pueden destacar las siguientes : metilenos, fenilos, amidas, uretanos, sulfuros, eter (oxi), esterres, carbonatos, imidas y sulfonas .

La unidad monomérica de un polímero puede poseer sitios cargados positiva o negativamente . Estos sitios pueden ser creados mediante reacciones de ionización de manera que la carga total de la molécula es función del pH y de la fuerza iónica de la solución . Los polímeros que tienen una predominancia de sitios negativos se denominan **aniónicos** y los positivos **catiónicos** . Los polímeros que no tienen sitios con carga o que tienen una tendencia muy baja a desarrollarla en soluciones acuosas se conocen como **no iónicos** . De hecho éstos, de acuerdo con la definición química no son estrictamente polielectrolitos . Los polímeros anfóliticos (ó **zwitteriónicos**) poseen tanto sitios positivos como negativos. Con frecuencia a los polielectrolitos catiónicos se les denomina coagulantes primarios mientras que a los aniónicos y no iónicos son conocidos como ayuda coagulantes .

Los polielectrolitos no iónicos son aquellos que no contienen grupos ionizables . Estos se adsorben y floculan produciendo un puente de hidrógeno entre una superficie sólida y uno de sus grupos no polares .

### 1. Polímeros no iónicos:

- a) Oxido de polietileno
- b) Poliacrilamida

### 2. Polielectrólitos aniónicos:

- a) Acido poliacrílico
- b) Poliacrilamida hidrolizada
- c) Poliestireno sulfonado (PSS)

### 3. Polielectrólitos catiónicos:

- a) Polidialildimetilamonio (PDADMA, Cat-Floc)

En el caso de los polielectrolitos aniónicos la carga negativa del polímero depende del número de grupos acrilamida que se han hidrolizado a grupos de ácido acrílico . Por ejemplo, si la poliacrilamida está hidrolizada en un 5%, 95 de cada 100 unidades monoméricas constituyen grupos acrilamida sin carga ; el 5% de las unidades monoméricas restantes son grupos acrilato cargados negativamente.

Se fabrican comunmente varios tipos de poliacrilamidas hidrolizadas con distintos grados de hidrólisis .

**TABLA 5. POLÍMEROS MAS COMUNES USADOS PARA LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA EN ESTADOS UNIDOS**

| NOMBRE COMUN Y ABBREVIACIÓN   | NOMBRE QUÍMICO  |
|---|---|
| <b>Polímeros de acrilamida</b>  |   |
| Poliacrilamida (poliacrilamida no iónica, PAM)  | 2-Propenamida, homopolímero (C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> NO) <sub>n</sub>   |
| Acilamida/copolímero de ácido acrílico (PAM-PAA)  | Ácido 2-propenoico, polimerizado con 2-propenamida (C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> NO.C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>n</sub>  |
| PAM-PAA (sal de sodio)  | Ácido 2-propenoico, sal de sodio, polimerizado con 2-propenamida (C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> .C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> NO.Na) <sub>n</sub>                           |
| Poli(DADMAC) Cloruro de dialil dimetil amonio, (homopolímero)   | Cloruro de N,N-Dimetil-N-2-propenil-2-propenil-1-aminio, homopolímero (C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> N.Cl) <sub>n</sub>  |
| Epi-DMA polímero/Epilclorhidrina-dimetilamina   | N-Metil metanamina, polimerizado con (clorometil)oxirano (C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> N.C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> ClO) <sub>n</sub>   |
| Epi-DMA   | Cloruro de Poli(dimetilimino)(2-hidroxi-1,3-propanedil (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> NO.Cl) <sub>n</sub>  |
| Epi-DMA con etilendiamina   | Polímero 1,2 de etanodiamina con (clorometil) oxirano y N-metil metanamina (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> N.C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> ClO.C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> N) <sub>n</sub> |
| Polímero adicional de epilclorhidrina básica polímero de poliamina/Epilclorhidrina con monometilamina | Metanamina polimerizada con (clorometil) oxirano (CH <sub>3</sub> N.C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> ClO) <sub>n</sub>   |
| Epilclorhidrina con una poliamina   | N,N-dimetil 1,3 propendiamina polimerizada con (clorometil)oxirano (C <sub>5</sub> H <sub>14</sub> N <sub>2</sub> .C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> ClO) <sub>n</sub>                          |
| <b>Poli(etil)enimina</b>  |   |
| Poli(etil)enimina   | Aziridina, homopolímero (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> N) <sub>n</sub>  |
| PEI*  | Etanimina, homopolímero (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> N) <sub>n</sub>  |
| PEI*  | Poli(imino 1,2 etanodiilo)(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> N) <sub>n</sub>  |
| <b>Polímeros de poli(etil)en poliamina</b>  |   |
| Poli(etil)en poliamina (Polialquilenamina)  | 1,2-Dicloroetano polimerizado con amoniaco (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub> .H <sub>3</sub> N) <sub>n</sub>   |
| Poli(etil)en poliamina*   | 1,2-Dicloroetano polimerizado con amoniaco (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub> .H <sub>3</sub> N) <sub>n</sub>   |
| Poli(etil)en poliamina*   | 1,2-Etanendiamina polimerizado con 1,2 dicloroetano (C <sub>2</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> .C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub> ) <sub>n</sub>                             |
| Polímeros de melamina y formaldehído  | 1,3,5-Triazina 2,4,6-triamino polimerizado con formaldehído (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> N <sub>6</sub> .CH <sub>2</sub> O) <sub>n</sub>  |
| Poliacrilamina(AMPAM) modificada por la reacción de Mannich   | N,N-[dimetil(amino)metil] 2-propenamida homopolímero (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub> O) <sub>n</sub>   |
| Poli(DMAEMA) (N,N-dimetilaminoetil metacrilato, homopolímero)   | 2-metil-2-ácido propenoico, 2-(dimetilamino) etil ester, homopolímero (C <sub>8</sub> H <sub>13</sub> NO <sub>2</sub> ) <sub>n</sub>  |

\* Compuestos de igual composición pero estructura diferente debida al proceso de fabricación.

Fuente : Letterman y Pero . Journal of AWWA . 1990 .

La capacidad de un polímero para actuar como floculante depende de su afinidad para enlazarse a la superficie de las partículas coloidales . Como resultado en muchos casos éstos materiales son bastante específicos . Los enlaces pueden ser formados entre grupos funcionales particulares del polímero y lugares específicos de la superficie coloidal .

Algunos otros parámetros importantes que afectan al rendimiento de un determinado polímero son su peso molecular y el grado de ramificación ó reticulación .

Las características en solución pueden ser importantes ; en particular el pH del sistema puede afectar a la carga del polielectrolito, por ej. el ácido poliacrílico y las poliacrilamidas hidrolizadas no tienen carga para valores del pH inferiores a 4, ya que el grupo carboxilato es un aceptor de protones .

De la actuación de éstos materiales poliméricos puede ser aprovechada su naturaleza de remover materia orgánica coloidal del agua . Las modificaciones antes mencionadas pueden influir en su peso molecular y la capacidad de intercambio de iones .

Aunque la mayoría de los polielectrolitos son materiales orgánicos sintéticos, existe un gran número de éstos materiales en desarrollo . Algunos de ellos son químicamente procesados para mejorar su aplicación y para hacer su producción más viable comercialmente .

### 5.2.1 Polielectrolitos Catiónicos

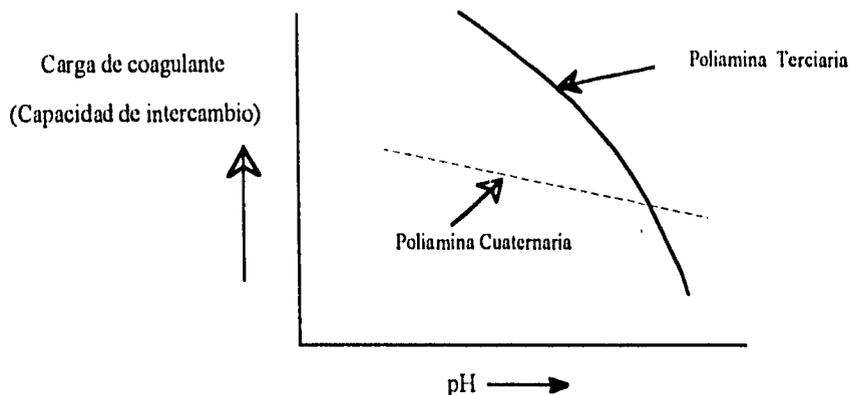
Los coagulantes primarios (polielectrolitos catiónicos) mejoran la coagulación y deposición (filtración) de las partículas cargadas negativamente por neutralización de la carga superficial de la partícula .

Para éste caso los procesos de mezcla rápida y lenta tienen una gran influencia en el rendimiento .

En cuánto a la composición de los polielectrolitos catiónicos sabemos que su estructura la forman las poliaminas ó aminas cuaternarias . En solución acuosa una poliamina se hidroliza como sigue :



En la hidrólisis , en un medio básico (OH<sup>-</sup>) la reacción se desplaza a la izquierda y el polímero se vuelve no iónico .



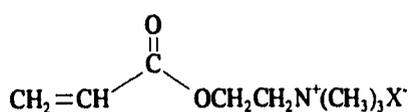
**FIG.6** Diagrama general que muestra la pérdida de fuerza catiónica para poliaminas terciarias al aumentar el pH y la no dependencia de los coagulantes de aminas cuaternarias respecto a éste. ( *Nalco Water Treatment Handbook, 1988* ).

En la FIG.6 se muestra la pérdida de la capacidad de carga de una poliamina terciaria cuando se incrementa el pH . En contraste, para los polímeros cuaternarios el efecto del pH es despreciable, tomando en cuenta que su carga positiva, se mantiene en un amplio intervalo de pH .

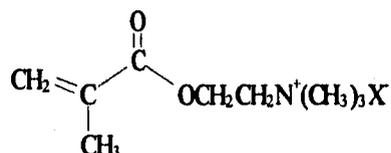
El 48.8 % de los polímeros catiónicos son floculantes que tienen como base la poli(acrilamida) y son copolímeros de acrilamida con monómeros de amina o aminas cuaternizadas .

Estas son comúnmente preparadas por copolimerización directa de aminoalquil ester o monómeros de aminoalquilamida cuaternizada por cloruro de metilo o dimetilsulfato .

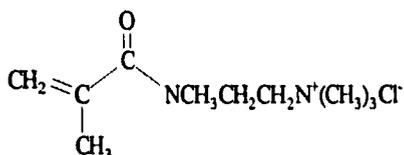
Los monómeros catiónicos comunes, son los siguientes :



Cloruro (o metil Sulfato) de N,N-Dimetilaminoetil acrilato (DMAEA.MCQ o DMAEA.MSQ)

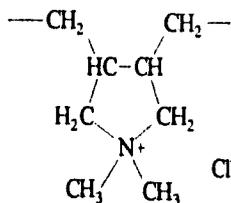


Cloruro (o metil Sulfato) de N,N-Dimetilaminoetil metacrilato (DMAEA.MCQ o DMAEA.MSQ)



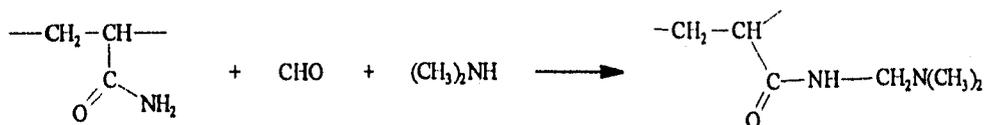
Cloruro de metacrilamido-N-propil trimetil amonio (MAPTAC)

Una excepción es el copolímero de acrilamida sintetizado con cloruro de dimetil dialil amonio de poli(acrilamida con cloruro de dimetil dialil amonio (DADMAC) que da una estructura cíclica al polimerizar .



Los copolímeros de acrilamida DADMAC son estables en un rango muy amplio de condiciones .

Los polímeros catiónicos pueden obtenerse también por una reacción posterior de la poli(acrilamida), como por la reacción de Mannich con formaldehído y poli(acrilamida) .



El producto puede convertirse en una sal de amonio cuaternaria de la forma usual .

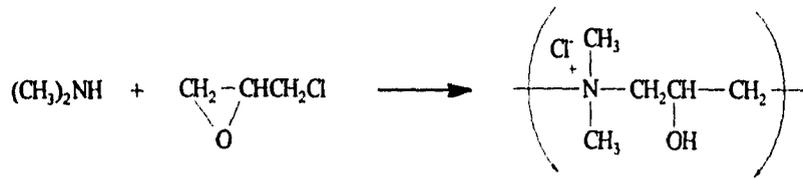
El grado de incorporación de carga se determina inicialmente por su costo, ya que los monómeros cargados son mucho menos caros que la poli(acrilamida) . Por lo tanto se utiliza la más baja densidad de carga que sirva para el propósito . Los valores entre 4 y 40% mol son comunes .

## Tipos de Amonio Cuaternario :

Aproximadamente un 18% de los floculantes poliméricos son homopolímeros de los monómeros de amonio cuaternario utilizados en la preparación de los copolímeros catiónicos de acrilamida . Estos son polielectrolitos de peso molecular medio a bajo con densidad de carga de 100% . En la literatura, se les conoce como coagulantes, poliDADMAC es por mucho el más importante .

### Floculantes basados en Poliaminas :

Los floculantes de poliamina se preparan de aminas y epíclorhidrina o dicloro etileno. (Vorchheimer, 1981)



El polímero comercial más importante Epi-TMA se obtiene por polimerización de dimetilamina(DMA) con epíclorhidrina :

Similarmente dicloroetileno EDC puede polimerizarse por desplazamiento nucleofílico con amoníaco o aminas para dar un gran número de productos como :



Entrecruzamiento con las aminas como Hexametildiamina HMDA y polimerización usando Epi y EDC dan polímeros de alto peso molecular . Se han comercializado muchas combinaciones de EDC y aminas . Por ejemplo : se ha preparado un polímero catiónico por la reacción de HMDA y EDC seguida por reacción con EPI .

### Floculantes Poliméricos naturales :

La mayor parte de los floculantes poliméricos naturales(97%) consisten en almidón y sus derivados (Mace R. Guy,1990 y N..M.Levine,1981). El almidón es un polímero no iónico de la glucosa y se obtiene principalmente del maíz (L.S.Sandell and P.Luner,1974) .

Los pesos moleculares dependen de la fuente y los métodos de procesamiento pero pueden alcanzar hasta varios millones . A pesar de que se utilizan algunos almidones no iónicos, la mayor parte de los floculantes son catiónicos . La formación de derivados con cloruro de dietil amino etilo o cloruro de 2,3 -epoxi propil trimetil amonio dan centros de amonio positivo (A.M.Kragh and Langston,1962) .

El almidón se compone de azúcares simples, en este caso de Manosa y Galactosa .

## Formas físicas

Los polímeros de peso molecular medio a bajo se venden más frecuentemente como soluciones acuosas concentradas que contienen del 10 al 50% en peso de polímero . Estos presentan una forma conveniente para su manejo y solo requieren dilución al ser utilizados .

Soluciones concentradas de polímeros de alto peso molecular exhiben altas viscosidades y no pueden ser manejadas por medios convencionales . Las soluciones diluidas son caras de transportar y pueden no ser estables . Para evitar éstas dificultades los polímeros de alto peso molecular se abastecen en forma sólida de gel o emulsión (Vorchheimer, N..M.Levine,1981) . Los sólidos se venden como granos, hojuelas o perlas, contienen de un 75 a 95% en peso de polímero , el resto es humedad, disolvente y sales.

Cuándo el agua en exceso no se retira después de una polimerización en solución, se forma un gel, tales productos se venden con un 30 a 35% de polímero .

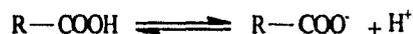
Los polímeros en emulsión son también llamados de emulsión inversa, latex o polímeros líquidos, combinan la conveniencia de un líquido con una alta concentración de polímero .

Los polímeros en emulsión son emulsiones de agua en aceite ; concentraciones de 25 a 30 % en peso son comunes .

### 5.2.2 Polielectrolitos aniónicos .

Los polímeros ayuda coagulante (aniónicos y no iónicos) tienen altos pesos moleculares, del orden de 10 veces más que los catiónicos . Se añaden una vez que el proceso de floculación se llevó a cabo para mejorar la consistencia de los aglomerados formados y aumentar su tamaño . Por lo anterior éstos polímeros se añaden en la filtración directa justo antes del proceso (O.Griot and J.A. Kitchener,1965) .

Los polielectrolitos aniónicos son aquellos polímeros orgánicos sintéticos que contienen ácidos carboxílicos en la cadena (-COOH) . Pueden contener también ésteres, alquil carboxílicos, fenilos, alquilos, halógenos, amidas, grupos hidroxilo y grupos alcoxi . Estos se ionizan de la siguiente manera:



El aumento de concentración del ión hidrógeno desplaza la reacción hacia la izquierda, así que los aniónicos se vuelven no iónicos a bajo pH .

## Utilidad de polímeros y copolímeros aniónicos.

\**Copolímeros de acrilamida-acrilato* : Se usa en la industria del azúcar . Este copolímero en la sedimentación (clarificación) permite que las impurezas del azúcar se conviertan en flóculos largos y densos, lo cual hace que las partículas floculadas se deshidraten antes de la filtración al vacío .

\**Acrilatos* : Se usan para la remoción de arcillas de corrientes de agua .

\**Copolímero de acrilamida-ácido acrílico* : Se utiliza en la clarificación y remoción de fosfatos .

\**Acido Acrílico* : Los polímeros que contienen al menos 80% de ácido acrílico y sus sales, son muy eficientes en la separación de lodos de la alumina .

\**Sulfonatos aromáticos de polivinilo* : Tiene un uso similar al del ácido acrílico .

### 5.2.3 Polielectrolitos no iónicos

La naturaleza iónica de los polielectrolitos es una característica determinante en la función de éstos materiales como coagulantes y floculantes . Otros factores tales como la naturaleza polar de los enlaces no iónicos en la molécula; tamaño molecular, geometría molecular, también juegan un papel muy importante y puede en algunos casos opacar los efectos de la carga y la densidad de carga .

Por lo tanto el peso molecular de los polímeros no iónicos es muy útil en muchos sistemas por su habilidad de atrapar y retener partículas coloidales en sitios polares de la molécula . Sin embargo, debido a su tamaño molecular, entre ellos pueden formar puentes y enlazar de ésta manera a pequeñas partículas .

Se han empleado los aminoaldehídos, poliglicidil (PM de 50 a 50 000 o más) y el latex orgánico sintético que ha demostrado ser muy efectivo en la floculación de materia orgánica e inorgánica suspendida .

Los *usos* de los polielectrolitos no iónicos son : Se usan como surfactantes oxialquilados para la remoción de sólidos, dispersión de polímeros de alto peso molecular en agua, remoción de sulfonatos de alquilbenceno de aguas residuales y remoción de la dureza del agua .

Los polímeros orgánicos no modifican el pH del agua, y generalmente no requieren un ajuste en el pH para su uso efectivo .

*Así que como regla general, los polímeros catiónicos son diseñados para trabajar a bajo pH y los aniónicos a un valor alto de éste . Los no iónicos y los cuaternarios solo son ligeramente afectados por el pH .*

La regla general no deberá ser interpretada para significar que los polímeros aniónicos no trabajan a valores bajos de pH, sino sólo se debe interpretar como que no formarán cadenas iónicas largas ; éstos pueden mostrar buenos resultados en cuanto a cantidad de sólidos floculados a bajo pH debido a sus enlaces no iónicos . Lo mismo se aplica a los polímeros

catiónicos, aunque ellos no tienen carga a altos pH, pueden actuar como coagulantes efectivos debido a sus grupos polares.

Los polímeros orgánicos resuelven muchos problemas inherentes en el uso de las sales de Aluminio y Hierro.

Los floculantes son de alto peso molecular y producen largos puentes entre pequeños floculos provocando así un crecimiento de éstos.

Los floculantes que trabajen bien en un sistema no siempre funcionan de igual manera en otro, ya que cada muestra de agua es distinta. Las pruebas necesarias para determinar los parámetros óptimos de operación se pueden llevar a cabo en el laboratorio o en una planta piloto. Los floculantes poliméricos a diferencia de los coagulantes no se eligen por neutralización.

A continuación se presenta una lista de los coagulantes y floculantes comúnmente utilizados en el tratamiento de agua:

| Clase  | Intervalo de Peso Molecular | Forma           |
|--|-----------------------------|-----------------|
| 1. Coagulantes Catiónicos<br>Poliaminas<br>Poliaminas cuaternarias<br>Poli-DADMAC, Epi-DMA           | Abajo de 100,000            | Solución acuosa |
| 2. Floculantes Catiónicos<br>Copolímeros de :<br>Acrilamida y DMAEM<br>Acrilamida y DADMAC<br>Aminas | Arriba de 1,000,000         | Emulsión        |
| 3. Floculantes no iónicos<br>Poliacrilamidas   | Arriba de 1,000,000         | Emulsión        |
| 4. Floculantes aniónicos<br>Poliacrilatos<br>Copolímeros de<br>Acrilamida y Acrilato                 | Arriba de 1,000,000         | Emulsión        |

Al igual que las sales inorgánicas, los polímeros no producen un floculo gelatinoso ni voluminoso.

## 5.2.4 Polímeros Zwitteriónicos

En los últimos años se ha manifestado un creciente interés hacia el estudio de compuestos que poseen estructuras tipo Zwitteriónicas conocidas también como anfólitos .

Estudios bibliográficos realizados hasta la fecha, revelan el gran interés mostrado, tanto desde el punto de vista fundamental como tecnológico, por las sustancias del tipo Zwitteriónico tanto en moléculas de bajo peso molecular como en macromoléculas .

Se realizaron investigaciones con éste tipo de estructuras y se determinaron algunas de sus características, algunas de éstas estructuras son :

### 1.- Las que presentan una estructura química única :

|   |  |
|---|--|
| <p>Las Sulfobetainas :</p> $\begin{array}{c}   \\ \text{---N}^+ \text{---}(\text{CH}_2)_n \text{---SO}_3^- \\   \end{array} \qquad \qquad \qquad \begin{array}{c} > \text{S}^+ \text{---}(\text{CH}_2)_n \text{---SO}_3^- \\ > \end{array}$         |  |
| <p>Las Betainas carboxílicas :</p> $\begin{array}{c}   \\ \text{---N}^+ \text{---}(\text{CH}_2)_n \text{---CO}_2^- \\   \end{array} \qquad \qquad \qquad \begin{array}{c} > \text{S}^+ \text{---}(\text{CH}_2)_n \text{---CO}_2^- \\ > \end{array}$ |  |
| <p>Los N-óxidos :</p> $\begin{array}{c}   \\ \text{---N}^+ \text{---O}^- \\   \end{array}$  | <p>Los Yluros :</p> $\begin{array}{c}   \\ \text{---N}^+ \text{---C}^- \begin{array}{l} \swarrow \text{CN} \\ \searrow \text{CN} \end{array} \\   \end{array}$ |

Como puede apreciarse de éstas estructuras, los zwitteriones poseen cargas de signo contrario unidas por enlaces covalentes, a diferencia de los electrolitos clásicos en cuyo caso las cargas opuestas están unidas unicamente por fuerzas de tipo electrostáticas .

Aunque los compuestos Zwitteriónicos son obtenidos a partir de moléculas orgánicas clásicas, poseen algunas de las características de las sales minerales por lo que se les ha denominado también como "sales internas" .

### 2. Poseen una naturaleza de tipo iónico.

Debido a ésta característica, las aplicaciones que presentan éstos materiales son fáciles de deducir y abarcarán los campos en los que tradicionalmente han venido empleándose compuestos iónicos "clásicos" . Es así, que los compuestos zwitteriónicos han sido y se siguen estudiando para su aplicación en la fabricación de tensoactivos con la aplicación en la elaboración de shampoos, detergentes, artículos de limpieza, etc.

3. *Es factible sintetizar polímeros que contienen estructuras zwitteriónicas;* tales como las encontradas por Monroy y Galín Fig. (7), que han sintetizado estructuras

zwitteriónicas del tipo vinil piridinas y metacrilatos; y Salamone y colab. Fig (8) han sintetizado y estudiado polímeros derivados del vinil imidazol .

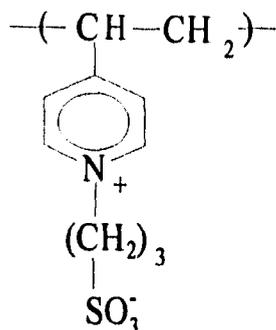


FIG.(7) Sal interna de la poli 4-vinil sulfopropil piridina

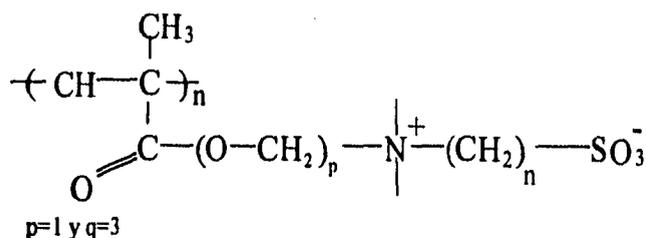


FIG.(8) Sal interna de la poli[hexil metacril 1-(3-sulfopropil) amonio]

**4. Los polímeros Zwitteriónicos poseen propiedades atractivas .** Entre las líneas de investigación estudiadas con éste tipo de polímeros podemos citar las sig :

*a) Propiedades en soluciones diluidas .* En soluciones diluidas se mostró que la viscosidad intrínseca de las soluciones acuosas de éstos polímeros es función creciente del contenido iónico del medio .

*b) Estudios de polaridad en función de su "microambiente".* Cómo es conocido, los métodos recientemente aplicados para extraer el petróleo atrapado por capilaridad en la roca porosa de los mantos petrolíferos, hace uso de agentes tensoactivos y/o de polímeros hidrosolubles . El uso de polímeros hidrosolubles tanto sintéticos (como es el caso de los tipo electrolitos, como la poliacrilamida parcialmente hidrolizada) como naturales (xantatos y polisacáridos) han presentado una dificultad hasta ahora insalvable : las viscosidades de sus soluciones poliméricas decrecen bruscamente en presencia de pequeñas cantidades de sales minerales disueltas, presentes siempre en los mantos petrolíferos .

*c) Propiedades en estado sólido .* En el caso de las propiedades en estado sólido, los estudios más recientes revelan un gran espectro de aplicaciones potenciales . Una propiedad en extremo interesante es la capacidad que poseen los homopolímeros del tipo sulfobetaina de formar soluciones homogéneas de una sal mineral dentro de la matriz polimérica en proporciones un poco mayores a las usuales si las comparamos con otras estructuras

poliméricas . Así los homopolímeros zwitteriónicos derivados del metacrilato (Ver FIG.7 con  $p=2$  y  $q=3$ ), mostraron segregación de fases entre el polímero y la sal disuelta .

En otro aspecto relativo a sus propiedades en estado sólido, se ha podido mostrar que éstos materiales poseen altas constantes dieléctricas poco usuales en materiales orgánicos: los valores se encuentran en el intervalo de 5 y 100, comparados con los mismos polímeros sin grupos zwitteriónicos, cuyos valores se encuentran entre 3 y 8 . Estos resultados sugieren aplicaciones en piezoelectricidad . En aplicaciones concretas, se puede pensar en fabricar "pilas secas" empleando estos materiales como soporte para los electrolitos de la pila . La verdadera limitación que presentan éstos materiales para su aplicación tecnológica, está relacionada con una propiedad intrínseca que es la temperatura de transición vítrea que presenta el sistema polímero-sal .

##### *5. Los polímeros zwitteriónicos poseen grupos altamente polares .*

Los momentos dipolares locales de las sulfobetainas son incrementados por un factor de casi 2 con respecto aquellos de sus precursores amino terciarios . Esta propiedad optimiza las posibilidades de interacciones dipolo-dipolo entre los grupos zwitteriónicos y de tipo dipolo-dipolo y ion-dipolo entre los sistemas zwitteriones-sal, obteniéndose materiales de tipo dieléctrico con toda la potencialidad de aplicaciones .

##### *6. Es posible obtener copolímeros zwitteriónicos .*

Existen dos alternativas para poder sintetizar copolímeros zwitteriónicos . La primera consiste en realizar la reacción de cuaternización . Es decir, dada la relación de monómero a agente cuaternizante, nos permite obtener materiales con características similares a copolímeros al azar . La segunda alternativa consiste en obtener un copolímero a partir de sus respectivos monómeros (zwitteriónicos y amino terciarios) por las técnicas tradicionales (emulsión, solución, etc.) y dependiendo de sus respectivos coeficientes de reactividad, podemos obtener copolímeros al azar, en bloque o alternos (**Tesis Doctoral de Cardoso Martínez Judith M.L., 1991**) .

Desde hace varios años ; se han llevado a cabo experimentaciones que sustentan la propuesta de utilizarlos como floculantes en el tratamiento de agua . Estos generalmente son derivados de poli(acrilamidas, poliaminas o componentes cuaternizados . La presencia de grupos iónicos en las macromoléculas los hacen aprovechables particularmente para el proceso de floculación .

Sin embargo la mayoría de los efluentes contienen sales de diferentes tipos que producen una contracción en la cadena del polielectrolito y en las propiedades para inducir a la floculación .

### 5.3 FACTORES QUE AFECTAN EL USO DE POLIELECTROLITOS

Propiedades de la solución : Los polímeros floculantes se distinguen por su tipo de carga, su densidad de carga y su peso molecular (C.R. O'Melia, J.A. Kitchener, 1972 y Vorchheimer 1981) :

#### Densidad de carga :

Es la relación que existe entre el número de cargas y el número de monómeros . Esta puede ir desde un intervalo de 100% en mol para homopolímeros preparados con monómeros cargados, hasta cero para los polímeros no iónicos . Una densidad de carga media se obtiene por copolimerización de monómeros cargados y no cargados o por la reacción parcial de la cadena polimérica . La densidad de carga es frecuentemente calculada en % en mol, la carga del monómero en el material inicial se encuentra experimentalmente por titulación coloidal . Ésta distribución de la carga, es necesaria para reunir los requerimientos para varias aplicaciones .

#### Peso Molecular :

El efecto del peso molecular sobre la floculación se discute mejor en términos de los mecanismos de enlazamiento y de las zonas electrostáticas . En sistemas en los cuales el enlazamiento predomina sobre la carga, un aumento en el peso molecular mejora la floculación . A mayor peso molecular (J.Gregory, 1973), el polímero puede extenderse más allá de la superficie de la partícula . En efecto, esto aumenta el tamaño de la partícula y el número de colisiones, por lo tanto la velocidad de floculación . A pesar de que la carga aniónica puede impedir la adsorción sobre una superficie negativa también sirve para promover la extensión del polímero por repulsión mutua de cargas . Se determinó un peso molecular óptimo, sobre el cual la eficiencia disminuía, esto se atribuyó a repulsión estérica entre las moléculas de polímero .

Aún no se encuentran bien definidos todos los efectos del peso molecular y la densidad de carga del polímero .

En algunos estudios (Nalco Water Treatment Handbook, 1988) se ha observado que la eficiencia de los polielectrolitos catiónicos es independiente del peso molecular pero está íntimamente ligada a su densidad de carga . Para soluciones con fuerza iónica baja el peso molecular influye en la floculación de forma positiva pero que en soluciones con una alta fuerza iónica (como sería al agua residual) éste efecto es despreciable y netamente sobrepasado por el de densidad de carga .

Los pesos moleculares van desde  $10^4$  a  $10^7$  (Ver la TABLA No.6). El límite mínimo es dictado por un tamaño mínimo requerido, por solubilidad o limitaciones sintéticas .

| Descripción | Intervalo (g/mol)                 |
|-------------|-----------------------------------|
| bajo        | $10^4$ a $10^5$                   |
| medio       | $10^5$ a $10^6$                   |
| alto        | $1 \times 10^6$ - $5 \times 10^6$ |
| ultra-alto  | cerca de $5 \times 10^6$          |

TABLA No.6

### Presencia de Materia Orgánica :

La presencia de ácidos húmicos inhibe la acción de los polímeros catiónicos que actúan como un polielectrolito aniónico que se combina con el polímero . Esta reacción implica el empleo de dosis muy grandes de polielectrolito catiónico para contrarrestar el efecto de la materia orgánica .

### Fuerza iónica :

Ya que la fuerza iónica afecta significativamente a la floculación la valencia de los iones también es importante . La configuración molecular en una solución de polielectrolitos es fuertemente afectada por la fuerza iónica . Esto se indica por un aumento en la viscosidad de una solución de polielectrolito al disminuir la fuerza iónica .

Cambios similares en la cadena del polímero tiende expandir la cadena como resultado de repulsión de cargas mutuas . Mientras la fuerza iónica aumenta, las cargas le permiten al polímero doblarse y tomar un volumen hidrodinámico más pequeño como se indica por el descenso en la viscosidad . Estos efectos se manifiestan en el mecanismo de floculación, ya que al disminuir la fuerza iónica el polímero se expande en solución y aumenta el enlazamiento *aumentando el radio efectivo de las partículas* .

La concentración óptima de polímero aumenta con la fuerza iónica, a pesar de que ésta no tiene ningún efecto sobre el peso molecular (**J.Gregory, 1973**) . Otros investigadores encontraron sin embargo que la fuerza iónica no controla los efectos del peso molecular, indicando que la dosis óptima de floculación disminuye al aumentar el peso molecular . A fuerzas iónicas altas y pesos moleculares altos, la concentración óptima de floculación es independiente del peso molecular . Además en tanto que el mecanismo de neutralización de carga sea operativo, en sistemas donde el floculante y la superficie estén cargados de manera opuesta, los efectos de la fuerza iónica se llevarán a cabo a través de una compresión de la doble capa .

En general, los polielectrolitos no iónicos y aniónicos prácticamente no tienen efecto en la remoción de sólidos y cuando ésta ocurre se debe a la formación de puentes intramoleculares . En cambio, la eficiencia lograda con los catiónicos es importante y dependiente de la densidad de carga (a mayor mejor es la remoción) debido a que el mecanismo de desestabilización es la etapa importante .

### Efectos del pH :

Las especies efectivas en los floculantes inorgánicos pueden ser iones metálicos solvatados, un producto de hidrólisis cargado soluble ó un hidroxido precipitado . Los iones metálicos solvatados afectan a la floculación a través de la compresión de la doble capa y efecto de Schulze-Hardy . Para floculantes a base de Al y Fe, éste efecto puede ocurrir a pH muy bajos ( $\text{pH} \approx 1$ ), al aumentar el pH y la concentración, las especies hidrolizadas solubles se cargan ( $\text{pH}$  3-5) . La floculación ocurre por neutralización de carga, por adsorción y posiblemente por un mecanismo enlazante .

Finalmente de pH 6 a 9 los hidróxidos precipitan y reticulan a las partículas suspendidas por un mecanismo de arrastre de flóculo .

Cuando los coloides son hidrofílicos, como los ácidos húmicos, el pH afecta la protonación . En presencia de grupos ionizables ácidos o básicos la carga superficial del coloide es afectada por cambios del pH . Los ácidos húmicos por ejemplo, pueden precipitarse al disminuir el pH protonando los grupos carboxilatos .

En la floculación de polímeros orgánicos, el pH puede afectar el mecanismo y la actividad del polímero . Las partículas de Latex de poliestireno (100 mg/L) fueron floculadas con polivinil amina de peso molar  $4.5 \times 10^5$  a pH 3, 9 y 10 .

A pH 3, donde el 95% de los grupos amino fueron protonados, la concentración óptima fué de 0.178 mg/L . A pH 9, se requirió 0.605 mg/L . A pH 10, solamente el 3% de los grupos amino fueron protonados, el 3.35% mg/L de polímero se requirió para la máxima floculación .

A pH 3 se siguió el mecanismo de floculación en regiones electrostáticas, mientras que a pH 10, la mayor parte de la floculación ocurrió por enlazamiento, aunque el polímero es esencialmente no iónico . La concentración de grupos amino a este pH, comparado con el de pH 3 indica la ineficiencia de los polímeros de mediano peso molecular para flocular una suspensión diluída . A pH 9, en donde el 13% de los grupos amino son protonados, se aplican ambos mecanismos . Sin embargo, el incremento de las cargas promueve el enlazamiento debido a que el polímero alcanza su expansión máxima . Este efecto como se discutió previamente, es el resultado de las repulsiones mutuas en la cadena .

En el presente trabajo se llevó a cabo un estudio de las propiedades de floculación con diferentes clases de macromoléculas iónicas, en donde se le dió principal atención a los polímeros que contenían grupos N-óxido .

Los polímeros zwitterionicos son capaces de proporcionar estabilidad química y tienen gran solubilidad en agua .

Además de ésto presentan una gran expansión en las dimensiones de la cadena , mostrando un incremento de su tamaño molecular con el aumento de la fuerza iónica en solución acuosa, lo cual es una propiedad muy deseable en los polímeros floculantes .

(Manero.B., Orta de Velásquez, Cardoso M.,1990) .

### **Concentración del polielectrolito :**

La obtención de una dosis óptima no es un experimento trivial ya que diferentes dosis de polielectrolito conducen a resultados diferentes que hacen que a dosis inferiores se logre una mejor eficiencia de remoción como es el caso de los polielectrolitos comerciales probados, Nalcomex y Prosifloc y los Zwitteriónicos en cuestión .

### **5.3.1 Aplicaciones al Proceso de Coagulación-Floculación**

#### **Clarificación de Agua :**

Los floculantes sintéticos son compuestos químicos utilizados para la clarificación de agua potable y agua para procesos industriales (C.R. James and C.R.O'Melia,1982 y W.L.K.Schwoyer,1981) .

Su función principal es la remoción de sólidos suspendidos, los cuales causan turbiedad también remueven color y precipitan sales orgánicas e inorgánicas, son utilizados además de Coagulación-Floculación para ayudar a mejorar la sedimentación y para promover una mejor retención en la filtración directa .

Entre los productos químicos utilizados en la clarificación de agua, podemos citar al  $Al_2(SO_4)_3$  . A pesar de la buena acción en la mayor parte de los casos, tiene la desventaja de los floculantes inorgánicos discutidos previamente, pero es barato .

Los polielectrolitos catiónicos de peso molecular bajo y medio, usualmente el poli(DADMAC) no requieren ajuste de pH y reducen el volumen de lodos . Sin embargo, son más caros que el  $Al_2(SO_4)_3$  y no son eficientes en la remoción de sales y color . Así los polielectrolitos son comúnmente utilizados en combinación con  $Al_2(SO_4)_3$  u otros coagulantes . (C.R. James and C.R.O'Melia, 1982) .

La dosis de coagulante depende de la calidad de agua ; los polielectrolitos son aplicados de 0.1-10 mg/L de agua procesada . La concentración de coagulantes inorgánicos puede ser de 10-100 veces más alta ; el costo de los polielectrolitos orgánicos puede ser de 10-30 veces más alto por unidad de peso, que los inorgánicos .

Los floculantes poliméricos de peso molecular alto y ultra alto, son utilizados frecuentemente en combinación con coagulantes primarios para la sedimentación o filtración como coagulantes o ayuda de filtración, respectivamente .

Los polímeros de acrilamida aniónicos y no iónicos son empleados para éste propósito a concentraciones de 0.1 mg/L .

Los floculantes son utilizados también en la separación por gravedad y en procesos de flotación para procesos de clarificación de agua industrial y municipal . Para aguas residuales que contienen principalmente componentes inorgánicos se prefieren floculantes aniónicos, sin embargo para las aguas residuales que contienen componentes orgánicos, se prefiere utilizar floculantes catiónicos en concentraciones típicas de 0.2-1 mg/L . Se puede requerir una concentración mayor para aguas residuales industriales .

Los floculantes poliméricos se emplean en el tratamiento de agua residual en la industria metalúrgica, de compuestos químicos, del papel, en la de alimentos, refinerías y en la textil . La información para el tratamiento de algún tipo de agua en particular, se encuentra en la revista anual *Journal of water pollution control federation's* y en *Proceedings of the industrial waste conference* que se realiza anualmente en la Universidad de Purdue .

En la clarificación de aguas residuales, los coagulantes se utilizan como estabilizadores para remover turbiedad y para inducir la formación de sólidos suspendidos provocando una estabilización rápida .

Los polímeros crean flóculos de mayor tamaño (0.3 a 1 mm) empleando dosis muy bajas (1 a 5 mg/L ) y en combinación con aluminio o hierro . Los polielectrolitos en general no son afectados por el pH y pueden servir como coagulantes al reducir la carga de un coloide .

***Actualmente no se conoce bien el mecanismo de acción de los polielectrolitos . En una solución con mezcla ocurre lo siguiente:***

- a) Transporte del polímero hacia los sólidos suspendidos .
- b) Adsorción (adhesión inicial) de las cadenas poliméricas .
- c) Acomodo de los polímeros adsorbidos para formar configuraciones en equilibrio .
- d) Colisión entre partículas que tienen polímeros adsorbidos para formar flóculos .
- e) Ruptura de flóculos .

***Estas etapas pueden ocurrir en forma simultánea, la única limitante sería la adsorción inicial del polímero y su transporte .***

***Los tipos de pruebas de laboratorio empleadas para seleccionar el mejor ayudante químico y aproximar la dosis para lograr la clarificación pueden ser :***

- \* Prueba de jarras
- \* Prueba de conos de Himmhoff.

Tanto las pruebas de jarras como la de conos se usan cuando la muestra a clarificar tiene menos de 5000 mg/L de sólidos suspendidos .

Para la clarificación de agua muy contaminada, se requiere estabilizar sólidos y la mayoría de las corrientes primarias se encuentran dentro de ésta categoría .

El carbono y los minerales, se remueven en la clarificación primaria y son ejemplos de residuos pesados .

Las pruebas de jarras simulan el tipo de mezclado y condiciones de estabilización para encontrar la dosis óptima de clarificación en una planta . El laboratorio donde se deben realizar éstas pruebas debe contar con un agitador de paletas de seis unidades de agitación y un motor de velocidad variable con el que se pueda controlar la energía de mezclado en las jarras . **(Nalco Water Treatment Handbook,1988)**

### **Manufactura del papel :**

Los floculantes se utilizan en la industria del papel en muchas maneras . Se les menciona como auxilios de retención ya que detienen pigmentos, rellenos y fibras finas y reducen los costos . Además la floculación de los componentes del papel permiten un drenaje rápido o la liberación del agua durante la tintura o abastecimiento en la formación de las hojas . Un drenaje rápido aumenta la producción, reduce los costos de energía, mejora la distribución de fibras a través de la hoja y aumenta su fuerza .

La aplicación de los floculantes depende en gran manera de la historia de la pulpa .

Tanto el  $Al_2(SO_4)_3$  como los polímeros catiónicos se utilizan para neutralizar las fibras negativas del papel . Ya que el  $Al_2(SO_4)_3$  forma floculos pequeños y frágiles, puede también utilizarse junto con un polímero de alto peso molecular aniónico o catiónico dependiendo de la neutralización de carga dada por el  $Al_2(SO_4)_3$  (los floculantes aniónicos requieren la presencia de éste) . Los copolímeros catiónicos se utilizan más a menudo que los aniónicos . El almidón catiónico funciona también como floculante cuando se le adicionan la textura de las fibras para aumentar la fuerza .

Basado en el polímero sintético seco y en el peso final del papel, las concentraciones del polímero están entre 0.01 y 0.1% en peso . Se requieren mayores cantidades de almidón catiónico (0.2-2.0% en peso, basado en el peso de papel seco) para obtener la misma floculación obtenida por polielectrolitos sintéticos ; sin embargo el almidón catiónico es mucho más barato .

El uso de almidón catiónico en la manufactura del papel, constituye la más grande aplicación de floculación para los polímeros naturales .

### **Procesamiento de minerales :**

En todas las operaciones de minería, los sólidos y líquidos deben separarse ; éstos procesos pueden facilitarse por medio del uso de floculantes en el adelgazamiento de las espumas concentrados de flotación y en los pasos de clarificación . En la mayor parte del procesamiento del mineral los sólidos finos suspendidos son impurezas que vienen de la molienda y tamizado .

Estos se separan como la fase sólida mientras que el mineral de interés permanece todavía en solución . Una excepción es la preparación de carbón de piedra . Las industrias de minerías que requieren floculantes incluyen la del carbón de piedra, bauxita, uranio, ganga de hierro potasa y cenizas de sodio, siendo la industria que más los utiliza la de carbón de piedra .

Para la neutralización de carga, se utilizan polímeros catiónicos con peso molecular de bajo a medio de tipo amonio cuaternario como poliDADMAC o poliamina, especialmente en la recuperación de carbón de piedra . Los principales coagulantes poliméricos sintéticos son aniónicos como el copolímero Acrilamida-Acrilato y se utilizan también grandes cantidades de poliacrilamida no iónica .

Cerca de la mitad de los floculantes poliméricos utilizados en 1982 en la minería fué almidón, que sin embargo es menos efectivo que los polímeros sintéticos ; éstos últimos se utilizan en una relación 0.02-1.32 kg por tonelada de ganga seca . El almidón se utiliza aún en grandes cantidades como floculante en el procesamiento de la ganga de hierro, bauxita, potasa y ceniza de sodio pero está siendo reemplazado rápidamente por los polímeros sintéticos .

### **5.3.2 Ventajas de los polímeros floculantes .**

- Los flóculos son grandes, fuertes y se forman mucho más rápido .
- La concentración de las sales no se incrementa y mucho menos la generación de lodos ; Por ejemplo, la formación de lodos con un polielectrolito típicamente contiene el 1% del polímero en base seca, mientras que la concentración de los floculantes inorgánicos puede ser tan alta como 20% .
- Los floculantes inorgánicos frecuentemente requieren un ajuste de pH, lo cuál no es necesario con los floculantes poliméricos .
- Los floculantes poliméricos, son de fácil manejo . Sin embargo los flóculos inorgánicos son baratos y se usan por razones económicas .

**Los polímeros sintéticos solubles en agua ofrecen las siguientes ventajas :**

- Consistencia y uniformidad en el producto .
- Proporcionan una estabilidad química y biológica real . Sin embargo, los polímeros sintéticos son más caros, además de la limitante de ser utilizados para usos específicos .

### **5.3.3 Ventajas del nuevo Floculante Zwitteriónico .**

**Se logra mayor eficiencia con respecto a los existentes en el mercado debido a las propiedades siguientes :**

- \* ***Coexistencia de ambas cargas (debido a su naturaleza como Zwitterión), es decir, puede funcionar como polielectrolito aniónico o catiónico según la variación del pH .***
- \* ***Aplicación en un amplio rango de calidad del influente***
- \* ***Menor volumen de lodos residuales generados***
- \* ***Mayor eficiencia en los procesos de clarificación***
- \* ***Estructura biodegradable***
- \* ***Tamaño, forma y compactación***

**Los estudios realizados con las pruebas de jarras muestran que :**

\* Los polímeros Zwitteriónicos tienen un comportamiento similar a los polímeros comerciales, con respecto al pH de trabajo .

Un estudio realizado actualmente (CNA "*Saneamiento del Valle de México*" 1994) revela que la dosis del polielectrolito es independiente del pH .

En un estudio realizado anteriormente (O.Manero et.,al.,1991), en el que se estudiaron las propiedades floculantes de macromoléculas iónicas (polímeros con grupos N-oxido), éstos polímeros mostraron gran solubilidad en agua, una adecuada estabilidad química y además presentaron una expansión en las dimensiones de la cadena con un aumento en la fuerza iónica de las soluciones acuosas .

También se realizó un estudio comparativo de los polielectrolitos disponibles comercialmente y las estructuras sintetizadas con resultados que muestran una mejor separación de partículas por los polímeros Zwitteriónicos .

Con éstos polímeros se logra una separación de partículas bastante aceptable, formando flóculos estables incrementando la eficiencia cuando las soluciones están sujetas a convección .

En éste estudio preliminar, las propiedades de floculación de las estructuras sintetizadas, se midieron cuantitativamente al medir el decremento de la turbiedad en una solución de bentonita conforme se añadía el polímero . Se estableció un experimento controlado (Prueba de Jarras) idóneo para contabilizar la remoción de sólidos suspendidos de la solución .

Entre los parámetros medidos hasta entonces se pueden mencionar : Turbiedad inicial, la velocidad de agitación, la dosis del floculante, el pH de la solución, la temperatura, el volumen de muestra y el tiempo de sedimentación . Las propiedades de floculación fueron evaluadas con la determinación del índice de Willcomb; que consiste en enumerar del 1 al 10 según sea la transparencia que se aprecie visualmente .

En el trabajo anterior (Tesis de Lic. Ham O.P. y Crespo S.,1990), los tres polímeros utilizables para tratamiento de agua con los cuáles fueron comparados los zwitteriónicos ; fueron considerados como : polímeros no-iónicos de alto peso molecular (polyelectrokem 2000), un polielectrolito catiónico con una estructura similar a la poliacrilamida (Polyelectrokem 2100) y un polielectrolito aniónico , similar al ácido poliácrico (Polyelectrokem 975) .

En la presente tesis, la turbiedad no fué inducida con bentonita, sino que la eficiencia del polímero (ayuda-coagulante ó floculante) y de la cal ( coagulante elegido) fueron aplicados a un problema real que se trata de controlar, que es el tratamiento del agua cruda del Gran Canal que se utiliza para riego de áreas agrícolas .

Los parámetros medidos se mencionan en el Capítulo 6, en dónde las propiedades de floculación fueron evaluadas con muchos otros parámetros, lo cuál nos permite tener más datos acerca de cada uno de los polímeros probados . Se presenta también la dosis de floculante en función de la calidad del agua, con un tiempo de floculación igual a los tradicionales de 20 min .

### 5.3.4 Factores de salud y seguridad

Aunque muchos productos poliméricos son usualmente utilizados en el mercado en aplicaciones para agua potable o en la fabricación de productos de papel utilizados en la industria alimentaria deben ser aprobados por el departamento del ambiente, USEPA, y la USFDA. La EPA Water and Waste Management Office publica periódicamente los ayuda-coagulante aceptados para el tratamiento de agua potable siempre y cuando su aplicación no rebase la concentración recomendada. Similarmente, bajo el título 21 (Food and Drugs) del código de regulaciones federales (CFR), controla el uso de todas las sustancias que directa o indirectamente tienen contacto con el consumo humano.

No hay evidencia de que los polímeros sintéticos sean tóxicos. Algunas soluciones de polímero, sin embargo, pueden causar pequeñas irritaciones en la piel y en los ojos. Un problema de toxicidad se relaciona con la cantidad de monómeros residuales; (la acrilamida ha demostrado ser una neurotoxina) (J. Mallevialle, 1984). En aplicaciones para agua potable, los polímeros de poliacrilamida no deben contener cantidades mayores de 0.05% de acrilamida residual y éstos no pueden ser aplicados en conc. mayores de 1 ppm en peso.

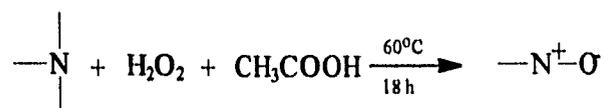
Para aplicaciones en agua no potable, los límites no se han establecido; sin embargo, el monómero de acrilamida residual, rara vez se encuentra arriba de 0.3%.

## 5.4. CARACTERÍSTICAS DE LA SÍNTESIS DE LOS NUEVOS FLOCULANTES ZWITTERIÓNICOS.

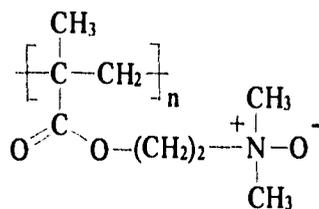
(Cardoso Martínez Judith Ma. de Lourdes, 1990)

Los polímeros floculantes del tipo N-óxido fueron sintetizados por reacciones de oxidación y funcionan como polímeros precursores. Los isómeros de la vinilpiridina y también de N,N-dimetil aminoetil metacrilato fueron oxidados con ácido acético glacial en peróxido de hidrógeno acuoso (30%).

La mezcla de reactivos se purificó por destilación en exceso de ácido acético. Finalmente la solución, fué enfriada y secada a  $-198^{\circ}\text{C}$  y puesta en vacío por 24 h



Los polímeros precursores y los productos oxidantes fueron caracterizados por UV, FTIR,  $\text{N}^1\text{HMR}$  y análisis elemental. Alrededor de  $200^{\circ}\text{C}$  se observó la descomposición de los componentes. Las determinaciones del peso molecular fueron llevadas a cabo por medio de UV en la 4 vinilpiridina. Fué estimado un valor de 57,000 mediante el uso de datos con el coeficiente de extinción. La estructura molecular del polímero que se utilizó se muestra en la siguiente FIG.(9)



**FIG.(9) Polielectrolito Zwitteriónico p-(DAEM)**  
 (poli N-oxido de metacrilato de N,N-Dimetilamino etilo)

A continuación se presentan las características físicas del polímero N-óxido de metacrilato de N,N-dimetil amino etilo en sus 4 presentaciones, las cuáles difieren en el último paso de su síntesis, que es la neutralización . (Datos proporcionados por la Dra. Judith Cardoso Martínez, 1995)

**Zwitteriónico No.1**

Nombre : POLI N-OXIDO DE METACRILATO DE N,N-DIMETIL AMINO ETILO  
 Peso Molecular : 1,200,000 g/mol  
 Observaciones : La neutralización se hizo con NaOH

**Zwitteriónico No.2**

Nombre : POLI N-OXIDO DE METACRILATO DE N,N-DIMETIL AMINO ETILO  
 Peso Molecular : 600,000 g/mol  
 Observaciones : La neutralización se hizo con NaOH  
 La funcionalización fué de 60%

**Zwitteriónico No.3**

Nombre : POLI N-OXIDO DE METACRILATO DE N,N-DIMETIL AMINO ETILO  
 Peso Molecular : No se ha determinado  
 Observaciones : Se neutralizó por resinas de intercambio iónico Merck del tipo fuertemente aniónico .

**Zwitteriónico No.4**

Nombre : POLI N-OXIDO DE METACRILATO DE N,N-DIMETIL AMINO ETILO  
 Peso Molecular : No se ha determinado  
 Observaciones : Se neutralizó por resina de intercambio aniónico AMBERLITE .

## CAPITULO VI

---

### METOLOGÍA DE EXPERIMENTACIÓN

#### 6.1 CONTROL DEL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN EN EL LABORATORIO .

Para el diseño de una planta de tratamiento de aguas (ya sea potable o residual) es necesario conocer las condiciones óptimas de operación, para procurar en lo posible obtenerlas .

Tal es el caso de las condiciones de mezclado (tiempo y agitación) para llevar a cabo un tratamiento primario avanzado .

Para un tratamiento óptimo de coagulación, las condiciones que se deben tomar en cuenta son el tipo de coagulante, el pH, la turbiedad, la composición química de la disolución y los factores físicos (temperatura y condiciones de mezclado) .

Debido a la complejidad de las reacciones que ocurren durante la Coagulación-Floculación sólo es factible establecer las condiciones recomendables de trabajo en el laboratorio . Para éste propósito existen dos métodos : La Prueba de Jarras y la medición del Potencial Zeta ; éste último método sólo se mencionará, ya que no se hicieron determinaciones con él, debido a que el tipo de agua a analizar contiene demasiados componentes que interfieren en las mediciones .

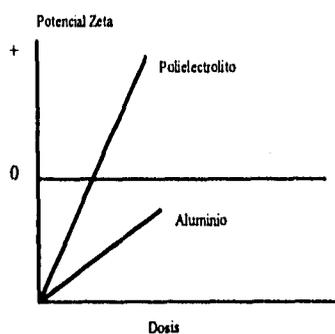
### 6.1.1 Medición del Potencial Zeta .

Existen muchos aparatos comerciales para ello, el más preciso es el que emplea rayo láser .

En la práctica existe una variación estadística de la movilidad individual de las partículas que se debe medir de 20 a 30 veces para tener un promedio .

El procedimiento consiste en :

- a) Colocar 1 L de muestra en un vaso de precipitados .
- b) Añadir dosis progresivas de coagulante (el pH óptimo debe ser previamente establecido ya sea por el método de prueba de jarras o por éste mismo método) .
- c) Mezclar rápidamente por 3 min. después de la adición del floculante e iniciar una agitación lenta .
- d) Determinar el potencial zeta después de cada adición y graficar el resultado como sigue :



**FIG.10.** Relación de la dosis vs Potencial Zeta (Ooten,R.J.,1993)

- e) Si se está usando un polielectrolito como ayuda coagulante éste debe ser añadido hasta el final .

### 6.1.2 Procedimiento Convencional (Prueba de Jarras) .

Se trata de un aparato con el cual se simula bajo condiciones controladas el proceso de coagulación-floculación . Consta de 6 vasos de precipitados de 1 L colocados sobre una plataforma llamada iluminador de flóculos, correspondiendo a cada uno de ellos 1 paleta de agitación o aspa cuyo número de revoluciones es regulado manualmente . Se tiene la ventaja de simular 5 procesos en paralelo ya sea variando el pH, la dosis de coagulante o la de polielectrolito, corriendo en cada caso 1 testigo ó referencia .

1. Se coloca 1 L de muestra en un vaso de precipitados .
2. Se agrega la dosis de coagulante deseada . (De ser posible al mismo tiempo a todas las jarras ó vasos de precipitados, para obtener resultados certeros). Dejando reposar durante 10 min .
3. Se agita a 100 rpm durante 1 min. (Mezcla rápida) .
4. Se agita a 30 rpm durante 20 min. (Mezcla lenta) para provocar una desestabilización y agregación de las partículas .
5. Se agrega el polielectrolito y en seguida se aumenta la agitación a 40 rpm. durante 1 minuto para que se logre homogeneizar la mezcla y se formen flóculos más compactos y pesados .
6. Se agita a 15 rpm durante 10 min para que comience la sedimentación .
7. Se detiene la agitación e inmediatamente se sacan las paletas para evitar que se levanten los flóculos ya formados y se lleguen a romper .
8. Después de esperar 10 min. a que termine el proceso de sedimentación, se procede a hacer las determinaciones en el sobrenadante .

El proceso se puede apreciar mejor en la tabla siguiente :

| ETAPA              | rpm                               | tiempo (min) |
|--------------------|-----------------------------------|--------------|
| <b>COAGULACION</b> | 100                               | 1            |
| <b>FLOCULACIÓN</b> | 30                                | 20           |
|                    | <b>ADICION DE POLIELECTROLITO</b> |              |
|                    | 40                                | 1            |
|                    | 15                                | 10           |
| <b>REPOSO</b>      | 0                                 | 10           |

**TABLA No.7.** Régimen utilizado en el experimento .

A continuación se describe el procedimiento empleado en la determinación de la dosis óptima:

- a) Se determinan los valores iniciales de los parámetros : Turbiedad, Sólidos Suspendidos Totales, Conductividad, pH y potencial eléctrico, DQO y N-NH<sub>3</sub> .
- b) A cinco de los vasos se le agrega una concentración fija de reactivo coagulante después de llenar los vasos con 950 mL del agua residual en estudio, tratando de agregarlo al mismo tiempo a todos los vasos con el fin de obtener mayor uniformidad en los resultados (Sánchez Cruz M.A.,1986) . El sexto vaso fué llenado sólo con agua residual, a fin de observar el efecto floculante producto de la agitación mecánica y corresponde al testigo ó referencia .
- c) Se inicia un mezclado rápido (100 rpm) durante 1 min., etapa en la cuál se lleva a cabo la Coagulación . Transcurrido el tiempo, se reduce la agitación a 30 rpm durante un lapso de 20 min., en ésta fase se efectúa la Floculación .
- d) Se dejan sedimentar los flocúlos durante un periodo de 10 min.
- e) Por decantación se separa el volumen de muestra requerido para las determinaciones analíticas .

Debido a que se desea obtener con el tratamiento primario avanzado un agua de calidad apropiada para su reutilización en riego agrícola, la eficiencia del proceso se estableció en términos de remoción de Turbiedad . Además se obtuvieron correlaciones entre las variables de Turbiedad con Sólidos Suspendidos Totales y Demanda Química de Oxígeno (DQO) .

En la primera etapa de muestreo se observó que por efecto del tratamiento con FeCl<sub>3</sub> se incrementa la conductividad eléctrica del efluente . Se puede establecer en términos generales, que con el empleo de dosis de 20 a 40 mg/L de FeCl<sub>3</sub> la conductividad eléctrica se incrementa en 400  $\mu$ mhos/cm, y a dosis de 50 mg/L, la conductividad se incrementa a un intervalo de 500 a 800  $\mu$ mhos/cm . Este efecto aunado a los altos valores de la conductividad eléctrica en el influente, pueden limitar el uso del agua tratada con FeCl<sub>3</sub> en riego agrícola de acuerdo con lo establecido en la NOM-CCA-032-ECOL/1993, ya que con éstos valores de conductividad, se incrementa el riesgo de salinizar los suelos .

## **6.2 DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD DEL INFLUENTE . (SITIOS DE MUESTREO)**

En ésta parte se define el intervalo de variación de las principales características del influente utilizando como parámetros la Turbiedad, Sólidos Sedimentables, pH, Conductividad Eléctrica . Estos parámetros fueron medidos en campo, en 50 muestreos realizados en cuatro periodos durante los meses de Septiembre de 1994 a Julio de 1995 en los siguientes sitios de muestreo :

1. En el Gran Canal, ubicado en la parte norte del Distrito Federal, en la colonia Nueva Atzacolco, previo a la confluencia del Río de los Remedios .
2. En la Planta Ecatepec (influente de la planta de Tratamiento de Aguas Negras de la CFE), ubicada al noreste del Distrito Federal, en el municipio de Ecatepec, Estado de México, en la colonia H. Mex., después de la confluencia del Gran Canal, el Río de los Remedios y el Dren General del Desagüe .

### **Muestreo :**

El valor de un resultado de laboratorio depende de la originalidad de la muestra . El propósito del muestreo es recoger una porción de agua lo suficientemente pequeña en volumen para ser manejada convenientemente en el laboratorio y al mismo tiempo ser representativa del agua que se pretende estudiar ; debe tomarse de forma tal que no se agregue ni pierda nada y que no se produzca ningún cambio desde la recolección hasta el análisis en el laboratorio .

Algunas recomendaciones para un muestreo adecuado se presentan a continuación :

- a) La muestra debe tomarse donde esté bien mezclada el agua ; ésto se logra fácilmente en los puntos donde el flujo es turbulento .
- b) Deben eliminarse las partículas grandes, sedimentos, crecimientos de las paredes y material flotante, ya que no serían representativos .
- c) Los recipientes de muestreo deben estar perfectamente limpios y serán enjuagados previamente con la misma agua que se muestreará .
- d) Las muestras deben examinarse lo antes posible, de otra forma, se debe preservar la muestra de acuerdo a lo especificado en técnica de análisis del parámetro a medir .
- e) Debe tomarse el volumen recomendado en la técnica de análisis .

En general, los muestreos se hicieron por la mañana antes de las 10:00 a.m. .

Este estudio se dividió en cuatro etapas de muestreo, cada uno correspondía a la experimentación con un polielectrolito distinto . Solamente en el primer periodo se muestreó en el Gran Canal y en la Planta Ecatepec en forma simultánea y en los siguientes tres

periodos solamente se muestreó en la Planta Ecatepec . En el segundo periodo la experimentación se realizó en el sitio del muestreo en un remolque adaptado para hacer los análisis de pruebas de jarras, turbiedad, DQO, sólidos, sulfatos, conductividad, potencial y pH ; en éste sitio, los muestreos se hicieron dos veces por día y en algunas ocasiones, cuándo el tiempo lo permitía se hacían tres veces al día .

A partir de la segunda etapa de muestreos, los análisis se realizaron en el Laboratorio del Instituto de Ingeniería de la UNAM en donde el agua a analizar era traída en garrafones y utilizando hielo como forma de preservación de la muestra (ya que la Planta Ecatepec queda aprox. a 2 h de Ciudad Universitaria), más aún cuándo se realizaban análisis de Nitrógeno Amoniacal, se necesita que la muestra esté acabada de tomar .

Durante el primer periodo de muestreo fué de Sep de 94 a Oct de 94, se probó el polielectrolito ZWITT. No.1, el segundo periodo de Feb de 95, se trabajo con el polielectrolito ZWITT. No.2, el tercer periodo de Mayo de 95 a Junio de 95 se trabajó con el polielectrolito ZWITT. No.3 y el cuarto periodo durante Julio de 95 se probó el polielectrolito ZWITT. No.4 .

### **6.3 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL INFLUENTE .**

Las características de las aguas residuales están definidas por ciertos parámetros que tienen especial significado, tanto para las de origen doméstico, como las industriales .

Cada uno de los análisis practicados fueron llevados a cabo, de acuerdo a los métodos estandarizados para el análisis de aguas y aguas residuales .

Las características más importantes de las aguas residuales son las siguientes :

#### **6.3.1 Turbiedad o Turbidez**

Mide la cantidad de materia suspendida en forma indirecta, cuantificando la cantidad que es reflejada, adsorbida y dispersada por el agua al hacer incidir un rayo de luz .

Cuanto mayor es la intensidad de luz dispersada, más intensa es la turbidez .

Las unidades empleadas más comunmente son las Unidades Nefelométricas de Turbiedad (UTN) .

De acuerdo a los datos obtenidos se puede observar que la turbiedad promedio para Gran Canal tiene un valor de : 350 UTN .

### 6.3.2 Conductividad Eléctrica

Es una expresión numérica que representa la habilidad de una solución para conducir la corriente eléctrica a través de la solución problema . La presencia de iones en el agua favorece el paso de la corriente eléctrica, por lo que es una medida indirecta de sustancias ionizadas en agua, tales como las sales inorgánicas ó sólidos disueltos fijos . Sus unidades son  $\mu\text{mohs/cm}$ .

Con respecto a éste parámetro se observan diferencias significativas entre las aguas del Gran Canal y de la Planta Ecatepec que son de  $1800 \mu\text{mohs/cm}$  ( $1.8 \text{ Ms/cm}$ ) y de  $3710 \mu\text{mohs/cm}$  ( $3.71 \text{ Ms/cm}$ ) respectivamente .

En la norma NOM-CCA-032-ECOL/1993, se establecen *los límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales de origen urbano y municipal para su disposición en riego agrícola* (Diario Oficial de la Federación, 18 Octubre de 1993 . Para la conductividad eléctrica, se señala un límite máximo permisible de  $2000 \mu\text{mohs/cm}$ , lo que indica que las aguas del Gran Canal generalmente cumplen con ésta norma, pero no las aguas de la planta Ecatepec . (Como se muestra en la tabla No.2 NOM-CCA-ECOL-032 en la pag.11)

### 6.3.3 pH

La medida del pH es una de las pruebas más importantes y frecuentes utilizadas en el análisis químico del agua . La concentración de los iones hidrógeno es medida por medio de un electrodo de vidrio el cuál desarrolla un potencial proporcional a los iones hidrógeno que penetran por su membrana, ésta medición se hace por medio de un potencial estandar .

Prácticamente todas las fases del tratamiento del agua para suministro y residual, como la neutralización ácido-base, ablandamiento, precipitación, coagulación, desinfección y control de la corrosión, dependen del pH . El pH se utiliza en las determinaciones de alcalinidad y dióxido de carbono y en muchos otros equilibrios ácido-base . A una determinada temperatura, la *intensidad* del carácter ácido o básico de una solución viene dada por la concentración del ión hidrógeno o pH .

La alcalinidad y acidez son las capacidades neutralizantes de ácidos y bases de un agua y normalmente se expresan como miligramos de  $\text{CaCO}_3$  por litro . La capacidad tampón es la cantidad de ácido o base fuerte, normalmente expresada en moles por litro, necesaria para cambiar el valor del pH de 1 L de muestra en 1 unidad .

El pH es un término que indica el logaritmo negativo de la concentración de ión hidrógeno, en otras palabras expresa el grado de acidez o alcalinidad de una muestra de agua .

$$\text{pH} = - \log [\text{H}^+]$$

Nuevamente se encuentran diferencias significativas con respecto a éste parámetro entre las aguas del Gran Canal y de la Planta Ecatepec, el promedio del primer sitio es de 7.04 y en el segundo es de 7.91 .

### **6.3.4 Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

La prueba de la Demanda Química de Oxígeno se emplea para medir el contenido de la materia orgánica presente en las aguas naturales y de desecho . Es también usada para determinar la materia orgánica de los desechos industriales y municipales que contienen sustancias tóxicas para la vida biológica .

La determinación de la Demanda Química de Oxígeno es importante, ya que proporciona la medida de oxígeno que es equivalente a la porción de materia orgánica presente en una muestra de agua, capaz de oxidarse por procedimientos químicos (oxidante fuerte) .

La DQO no da la diferencia entre la materia orgánica biológicamente oxidable y la inerte, tampoco proporciona la rapidez a la cuál la materia biologicamente activa se estabiliza en condiciones normales . Presenta ciertas ventajas sobre la prueba de la DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), por ejemplo, la DQO se hace en tres horas aproximadamente, y determina la cantidad de materia orgánica oxidable la cuál no puede ser evaluada en la prueba de la DBO (sólo considera la biológicamente oxidable) .

Cuando los desechos se caracterizan por el predominio de material que puede ser química o no bioquímicamente oxidado, la DQO es mayor que la DBO, como es el caso del agua residual doméstica .

La determinación de la DQO emplea dicromato de potasio en solución, éste es un oxidante estable y da resultados exactos . El dicromato oxida, en soluciones fuertemente ácidas, una amplia variedad de sustancias orgánicas casi completamente a dióxido de carbono y agua . Por ello, el método se basa en la destrucción de la materia contaminante con una mezcla de ácido crómico y sulfúrico en ebullición .

De tal manera que si somete a reflujo una muestra conteniendo materia orgánica, con ácido sulfúrico y dicromato de potasio (ya valorado), durante el periodo de reflujo, la materia oxidable reduce una cantidad equivalente de dicromato de potasio y el remanente se titulará con sulfato ferroso amoniacal . La cantidad de materia orgánica oxidable es proporcional al dicromato que se consume, con una simple ecuación estequiométrica podemos entonces calcular la cantidad de oxígeno consumido .

El promedio en DQO para la Planta Ecatepec fué de 490 mg/L aproximadamente .

### 6.3.5 Sólidos .

Es la materia que permanece como residuo después de evaporar una muestra de agua y secarla a una temperatura definida . Dependiendo de la temperatura de secado y de la capacidad de ser filtrados se tiene la siguiente clasificación (las unidades de todos son mg/L, excepto los sólidos sedimentables) :

**S.T.T. Sólidos Totales Totales.-** Indican el total de sólidos presentes en una muestra sin importar si son fijos, volátiles, disueltos o suspendidos .

**S.T.F. Sólidos Totales Fijos.-** Indican el total de sólidos inorgánicos sin importar si son disueltos o suspendidos .

**S.T.V. Sólidos Totales Volátiles.-** Representan el total de sólidos orgánicos volatilizables disueltos y suspendidos .

**S.D.T. Sólidos Disueltos Totales.-** Son los sólidos que pasan a través de un filtro, tanto fijos como volátiles .

**S.D.F. Sólidos Disueltos Fijos.-** Son los sólidos inorgánicos disueltos en el agua, principalmente sales .

**S.D.V. Sólidos Disueltos Volátiles.-** Son los sólidos orgánicos disueltos en el agua, principalmente materia orgánica .

**S.S.T. Sólidos Suspendidos Totales.-** Son aquellos sólidos que quedan retenidos por filtros, siendo orgánicos o inorgánicos .

**S.S.F. Sólidos Suspendidos Fijos.-** Son los sólidos inorgánicos no disueltos , tales como arenas .

**S.S.V. Sólidos Suspendidos Volátiles.-** Son los sólidos orgánicos no disueltos, como la materia orgánica en grumos o aglomerada .

**S.S. Sólidos Sedimentables.-** Son todos los sólidos que pueden llegar a sedimentarse en 1 hora . Sus unidades son mililitros/litro (mL/L) .

Este parámetro fué uno de los decisivos en cuanto a qué polielectrolito y qué coagulante se utilizaria para el tratamiento y se optó por el que removiera mayor cantidad de sólidos suspendidos en el efluente ya que, la formación posterior de lodos no podría ser alta ya que el suelo tiene una cierta capacidad de adsorción que no se debe alterar .

### 6.3.6 Potencial Electromotriz

No todo el trabajo teóricamente disponible en una reacción química puede transformarse en trabajo real . Parte de ésta energía se manifiesta como calor debido a la resistencia de la solución y de los conductores .

Otras de las dificultades es que las reacciones de electrodo causan cambios locales de concentración en la solución y éstos cambios tienden siempre a disminuir la f.e.m. . Esta diferencia es inevitable en cualquier dispositivo que transforme una clase de energía en otra .

No obstante , nuestro interés radica no tanto en obtener trabajo de una reacción como en medir el trabajo máximo que se puede obtener, pues ésto es lo que determina la fuerza impulsora . Para calcular éste trabajo máximo debemos medir la diferencia de potencial entre los electrodos *cuando no hay corriente a través de la celda* . El dispositivo usado para éste fin se llama el potenciómetro .

Este se considera como una celda galvánica, cuya f.e.m. puede variarse continuamente y leerse en un cuadrante . La f.e.m. del potenciómetro hace fluir una corriente a través de la celda y ésta se conecta de tal manera que ambas corrientes sean de dirección opuesta .

Un potenciómetro se ajusta hasta que la lectura es cero . En éste punto la f.e.m. de valor conocido del potenciómetro es igual a la f.e.m. de la celda .

Estas reacciones pueden producirse aplicando una corriente eléctrica . El potencial nos dá la concentración de iones hidrógeno o el valor de pH de manera indirecta .

### **6.3.7 Remoción de metales pesados**

La determinación de metales pesados presentes tanto en el agua sin tratamiento, como en el agua ya tratada es parte del presente estudio.

Los efectos de los metales en aguas potables y residuales pueden ser beneficiosos, tóxicos o simplemente molestos . Algunos metales resultan esenciales , mientras que otros pueden perjudicar a los consumidores de agua, a los sistemas de tratamiento de aguas residuales y a las aguas de depósitos . En muchos casos el potencial, beneficio ó riesgo depende de la concentración .

Los metales cobre, cadmio, plomo y arsénico determinados como parte de la metodología experimental, presentan características de toxicidad y en la evaluación de la calidad del agua son variables muy relevantes, particularmente cuando se pretende reutilizar el efluente final.

La mayoría de éstos metales son tóxicos y acumulativos y por lo tanto, interfieren en el proceso de tratamiento biológico .

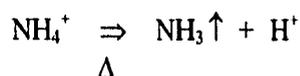
### **6.3.8 Nitrógeno Amoniacal (N-NH<sub>3</sub>)**

El amoniaco (NH<sub>3</sub>) es producto de la degradación de materia orgánica (principalmente de naturaleza protéica) por las bacterias, o bien, se origina a partir de la urea desechada por microorganismos y aún, puede formarse a partir del nitrógeno gaseoso de la atmósfera .

En el tratamiento biológico de agua residual es importante conocer si el agua a tratar contiene suficiente nitrógeno para los microorganismos y las determinaciones de amoníaco y nitrógeno orgánico brindan éste tipo de información . Por otro lado, la oxidación de amoníaco a nitritos puede demandar oxígeno en cantidades importantes y generar condiciones de bajo contenido de oxígeno disuelto en ríos y estuarios . Además el amoníaco presenta toxicidad aguda para varias especies de peces en concentraciones mayores de 0.2 mg/L . Para el proceso de cloración, el contenido de amoníaco es muy importante debido a que el cloro reacciona muy rápidamente con el amoníaco formando cloraminas . Esto puede aumentar considerablemente la demanda de cloro del agua a desinfectar .

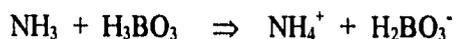
*Fundamento :*

El ión amonio se encuentra en equilibrio con el amoníaco y los iones  $H^+$  , para pH por debajo de la neutralidad . Sin embargo, para pH mayores de 9 el equilibrio es desplazado de manera tal que se consigue tener únicamente amoníaco . Este amoníaco es liberado de la solución junto con el vapor producido cuándo la muestra está en ebullición :



Al condensar el vapor, el amoníaco es adsorbido en el condensado . La función del buffer es evitar el descenso del pH por la liberación de los iones  $H^+$  al desplazar el equilibrio de la reacción descrita .

Empíricamente se sabe que todo el amoníaco es expulsado cuando se han destilado 200 ml de agua (manteniendo el pH) en muestras de 500 ml . El amoníaco contenido en el destilado es capturado en ácido bórico llevándose a cabo la siguiente reacción :



Al titular con ácido sulfúrico la reacción que se lleva a cabo es :



y en el punto final, la cantidad de ácido sulfúrico agregada es igual a la cantidad de amoníaco presente en la muestra .

Cabe señalar que el valor de Nitrógeno Amoniacal (N-NH<sub>3</sub>) aumentaba con el tratamiento, por razones que serán mencionadas en el próximo apartado .

La razón de éste análisis fue determinar si con el tratamiento no se eliminaba la cantidad de nitratos mínima requerida por los suelos para su fertilización, ya que como se mencionó en un principio éste tratamiento tiene como finalidad tratar el agua para que ésta cumpla con las normas para riego agrícola . (Como se muestra en la tabla No.2 NOM-CCA-ECOL-032 en la pag.11)

## 6.4 EQUIPO Y MÉTODO UTILIZADO PARA CADA PRUEBA .

| PARÁMETRO A MEDIR :              | MÉTODO   | EQUIPO UTILIZADO  |
|----------------------------------|--|---|
| Turbiedad                        | Nefelométrico  | Turbidímetro marca HACH   |
| Prueba de jarras                 | Aparato de Agitación controlada para prueba de jarras                    | Aparato para Prueba de Jarras. Phipps & Bird Stirrer. Mod-7790-400                        |
| pH                               | Potenciométrico  | Potenciómetro marca HACH - Mod.43800  |
| Conductividad Eléctrica          | Electrométrico   | Conductímetro marca HACH - Mod. 46600-00  |
| Potencial                        | Potenciométrico  | Potenciómetro marca HACH - Mod.43800  |
| Sólidos Sedimentables            | óptico   | Cono de Himmhoff  |
| Sólidos                          | Filtración y secado  | Cápsulas de porcelana, mufla y estufa   |
| Demanda Química de Oxígeno       | Oxidación con $KMnO_4$ (digestión) y lectura con Espectrofotómetro .     | Digestor de HACH Mod. 45600-00 y un Espectrofotómetro HACH DR-2000 Ver.3.1, Mod. 44863-00 |
| Metales Pesados                  | Digestión ácida en Horno de Microondas y lectura por adsorción atómica . | Horno de Microondas con equipo de teflón y aparato de Absorción Atómica Perkin Elmer .    |
| Nitrógeno Amoniacal ( $N-NH_3$ ) | Método titulométrico   | Destilador del aparato para determinación de Nitrógeno Total Kjeldhal .                   |

**Tabla No.8** Todos éstos métodos de análisis están reconocidos por la USEPA (*United States Protection Agency*) según el libro de los Métodos Estandarizados para análisis de aguas potable y residual .

## CAPITULO VII

---

### RESULTADOS

Este trabajo forma parte de un proyecto extenso en donde se investiga la mejor posibilidad de tratamiento de aguas del *Gran Canal* del Distrito Federal . El apoyo teórico considera la explicación del proceso de *Coagulación-Floculación* y la aplicación del mismo en el tratamiento de agua, así como los diferentes tipos de polielectrolitos y sus características .

*Los parámetros de control son :*

Remoción de Sólidos, Demanda Química de Oxígeno, remoción de metales pesados, Turbiedad, Conductividad Eléctrica, potencial, Dosis de Polímero ; pH óptimo de operación y Nitrógeno Amoniacal .

Se presentarán los resultados mediante tablas y gráficos, en donde se mostrarán comparativamente la función de los polímeros comerciales y los nuevos polielectrolitos .

*Procesamiento de la información :*

El control de la operación de un sistema de tratamiento de agua (así como su diseño) está basado en los resultados que se obtienen del análisis físico, químico y biológico de las pruebas de tratabilidad de aguas residuales, que consideran puntos intermedios del tratamiento y del efluente .

Debido a lo anterior y a que la generación de resultados de laboratorio debe ser sumamente grande con el transcurso del tiempo, se requiere establecer una metodología para el procesamiento de la información . Dependiendo de la frecuencia y cantidad de los análisis efectuados, éste procesamiento puede ser diario, semanal, mensual o anual .

El procesamiento básico considera :

- a) Valor Máximo, valor mínimo y rango .
- b) Media Aritmética de los valores obtenidos en cada prueba .
- c) Gráficas de las variaciones de calidad de agua obtenida con y sin el tratamiento propuesto (Tratamiento Primario Avanzado) .

Se llevaron a cabo un total de 50 muestreos con el fin de obtener datos representativos .

El estudio se realizó por partes conforme se sintetizaba cada uno de los polielectrolitos probados, la parte experimental se resume en el siguiente cuadro :

| Lugar de Análisis                         | Periodos de Prueba. | Coagulantes probados  | Polímero utilizado      | Análisis realizados (antes y después de la prueba de jarras)   | Cantidad de muestreos |
|---|---------------------|---|-------------------------|--|-----------------------|
| Instituto de Ingeniería                   | 1° Sep-Oct 94       | FeCl <sub>3</sub> y Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>   | ZWITT No.1 polímero ICA | SST, DQO total y soluble, UTN, SSV, SSF, S.Sed. y Prueba de Jarras   | 7                     |
| Planta Ecatepec                           | 2.Enero-Feb 95      | Ca(OH) <sub>2</sub> y Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | ZWITT No.1              | SST, DQO, UTN, SSV, SSF, SDT, pH, potencial, conductividad. y Prueba de Jarras                                     | 13                    |
| Planta Ecatepec e Instituto de Ingeniería | 3.Feb 95            | Ca(OH) <sub>2</sub> y Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | ZWITT No.2              | SST, DQO, UTN, SSV, SSF, SDT, pH, potencial, conductividad, N-NH <sub>3</sub> , metales pesados y Prueba de Jarras | 10                    |
| Instituto de Ingeniería                   | 4.Mayo y Julio 95   | Ca(OH) <sub>2</sub>   | ZWITT No.3 y 4          | SST, DQO, UTN, SSV, SSF, SDT, pH, potencial, conductividad, metales pesados y Prueba de Jarras                     | 20                    |

Tabla No. 9 Muestreos y tipo de análisis realizados .

## 7.1 EFECTOS DEL USO DE DISTINTOS COAGULANTES Y LOS MEJORES FLOCULANTES COMERCIALES .

La elección del coagulante se efectúa por medio de ensayos en el laboratorio, para ello deben tomarse en cuenta diversos factores :

- Naturaleza y Calidad del agua bruta .
- Variación de la calidad del agua bruta (variaciones diarias o según las estaciones, en especial la influencia de la temperatura) .
- Criterios de calidad y destino del agua tratada .
- Tratamiento previsto después de la coagulación (Coagulación sobre filtro, decantación) .
- Grado de pureza del reactivo, especialmente en el caso de aguas para abastecimiento público .

La forma en que se determinó cuál era el **coagulante** más eficaz, fué en un principio la determinación de Turbiedad y Sólidos Suspendidos en el influente o Agua Cruda, antes y

después del tratamiento y si después de las pruebas de jarras la eficiencia de remoción no era superior al 80%, el coagulante se descartaba para utilizarse otro .

Con el objeto de tener un mayor control de las condiciones de operación y probar en forma simultánea los dos coagulantes que resultaron efectivos ( $\text{Ca(OH)}_2$  y  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), el estudio se llevó a cabo en laboratorio con prueba de jarras empleando las condiciones que simularían el proceso en una planta piloto (en el caso de éste estudio, las condiciones de operación se simulan en la planta piloto de Ecatepec en donde se probaron los otros dos polielectrolitos comerciales Prosifloc y Nalcomex) .\*

Previo a las pruebas de tratabilidad a los polielectrólitos en estudio se les determinó su peso molecular, viscosidad y solubilidad, con la finalidad de definir la influencia de estas características en el proceso de coagulación-floculación y establecer de esta manera, criterios para la selección de polielectrólitos como ayuda-coagulantes . Los resultados de estos análisis se presentan en la **Tabla 10**.

| NOMBRE DEL POLIELECTRÓLITO | PESO MOLECULAR     | VISCOSIDAD<br>CPS a 24 °C | SOLUBILIDAD                                       |
|----------------------------|--------------------|---------------------------|---|
| ZWITTERIONICO              | $1.2 \times 10^3$  | 0.91                      | Soluble en agua, soluble en Butanol .             |
| PROSIFLOC                  | $24.2 \times 10^6$ | 4.32                      | Soluble en agua, forma gel insoluble en Butanol   |
| NALCOMEX                   | $17.1 \times 10^6$ | 2.82                      | Soluble en agua, forma gel insoluble en Butanol . |

**Tabla 10.** Principales constantes físicas de los polielectrólitos en estudio . (CNA. "Saneamiento del Valle de México", 1994) .

Sin embargo con relación al oxígeno disuelto, pudo observarse un aporte debido a la precipitación pluvial, ya que en los tres primeros muestreos correspondieron a la temporada de lluvia, el oxígeno disuelto fué superior a los muestreos posteriores, que corresponden al estiaje .

\* Los polielectrolitos comerciales Nalcomex y Prosifloc se estuvieron probando en forma simultanea en éstos 3 últimos periodos en la Planta Ecatepec .

### 7.1.1 Evaluación del FeCl<sub>3</sub> como coagulante .

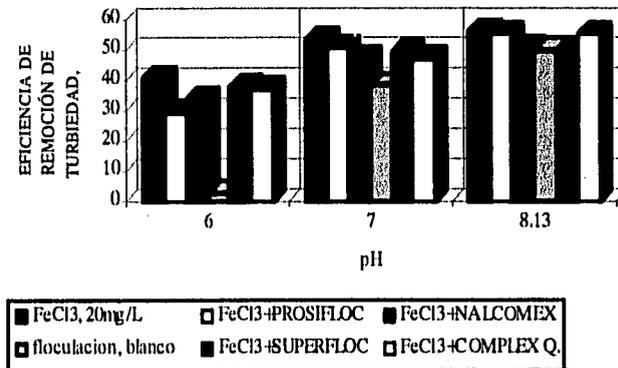
En las Fig 11 y 12 se presentan las gráficas de los resultados de las pruebas de tratamiento del agua del Gran Canal mediante el empleo de FeCl<sub>3</sub> con dosis de 20 mg/L y los polielectrólitos ayuda-coagulante con dosis de 0.4 mg/L .Las pruebas se realizaron bajo las siguientes condiciones :

pH original=7.0

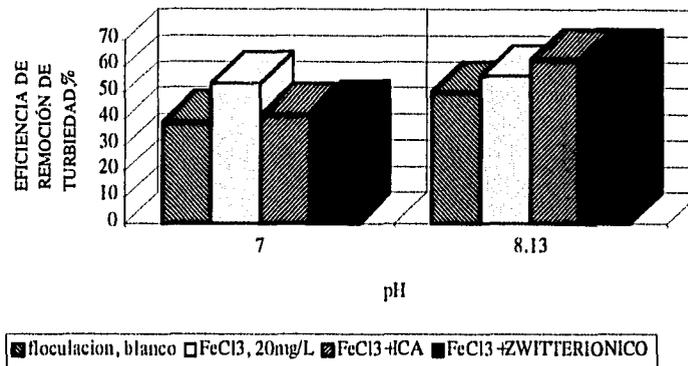
pH=6, ajustado con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 10%

pH=8.0, ajustado con NaOH al 10%

**FIG. 11 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO DEL AGUA DE GRAN CANAL MEDIANTE EL EMPLEO DE CLORURO FÉRRICO Y POLIELECTROLITOS**



**FIG 12 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO DEL AGUA DEL GRAN CANAL MEDIANTE CLORURO FÉRRICO-ICA Y ZWITTERIONICO**



Los resultados de éstos ensayos permiten establecer que no existen diferencias polielectrolito, ya sea con el polielectrolito comercial de la marca ICA o con el polímero Zwitteriónico, sin embargo se obtienen mejores eficiencias al utilizar solamente FeCl<sub>3</sub>. En éstas pruebas se observó que la eficiencia del tratamiento se incrementa aproximadamente un 10% por incremento del pH.

En el tratamiento de las aguas del Gran Canal destacan las eficiencias obtenidas por el sólo efecto floculante de la agitación mecánica, que registran valores del 40% para el pH original del influente y de 50% en condiciones ligeramente alcalinas.

En el tratamiento de las aguas residuales de la Planta Ecatepec, sólo se obtienen resultados de relativa importancia al pH original del influente, sin embargo como en el caso anterior las diferencias no son significativas entre el tratamiento de FeCl<sub>3</sub> y FeCl<sub>3</sub>+ polielectrolitos. Las mejores eficiencias, se obtuvieron mediante el tratamiento de FeCl<sub>3</sub>+ Nalcomex y FeCl<sub>3</sub>+ Prosifloc.

Se efectuaron pruebas utilizando como reactivo coagulante al hidróxido de calcio, con objeto de establecer un marco de referencia que permita evaluar los resultados obtenidos en el tratamiento con cloruro férrico.

◆ Se eliminó el uso del FeCl<sub>3</sub> debido a la formación de un color negro producto de la combinación del hierro con los sulfuros para formar FeS, con lo que aumentaba el color y la turbiedad y no permitía tener visibilidad alguna de los floculos formados.

**TABLA 11** Características del Agua del Gran Canal y de la Planta de Ecatepec  
(Marzo 1995) (CNA. "Saneamiento del Valle de México",1994.) .

| PARÁMETRO                              | GRAN CANAL |                     |      |      | ECATEPEC |                     |      |       |
|--|------------|---------------------|------|------|----------|---------------------|------|-------|
|  | Media      | Desviación estándar | MAX  | MIN  | Media    | Desviación estándar | MAX  | MIN   |
| pH                                     | 7.04       | 0.17                | 8.12 | 7    | 8.04     | 0.47                | 8.4  | 7     |
| Potencial, [mV]                        | -4         | 23                  | 13   | -75  | -53      | 15                  | 25   | -50.4 |
| Turbiedad [UTN]                        | 123        | 56                  | 233  | 67   | 216      | 57                  | 320  | 100   |
| Conductividad [mmhos/cm]               | 1466       | 322                 | 1800 | 1041 | 2650     | 220                 | 2920 | 2320  |
| Oxígeno disuelto [mgO <sub>2</sub> /L] | 0.82       | 0.45                | 2    | 0.2  | 0.74     | 0.23                | 1.3  | 0.4   |
| Sólidos suspendidos [mg/L]             | 108        | 26                  | 144  | 68   | 112      | 30                  | 144  | 68    |
| Sólidos suspendidos volátiles [mg/L]   | 68         | 17                  | 91   | 40   | 51       | 20                  | 80   | 28    |
| Sólidos suspendidos fijos [mg/L]       | 40         | 13                  | 60   | 28   | 70       | 13                  | 78   | 40    |

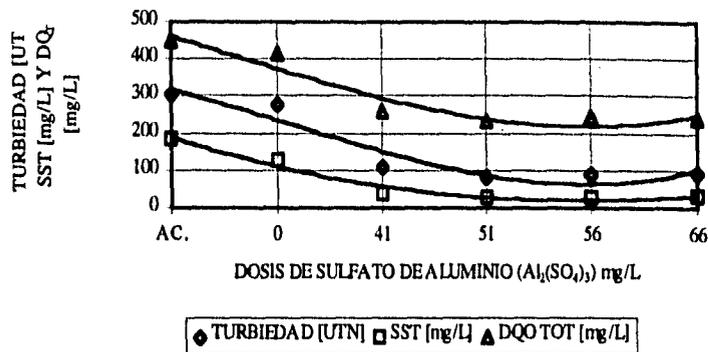
## 7.1.2 Evaluación del Sulfato de Aluminio como coagulante

Los principales resultados evaluados para el efluente en el empleo de sulfato de aluminio sin ningún floculante son mostrados en la TABLA 12 (FIG 13) así como el efecto de la coagulación mecánica .

**TABLA 12** Calidad del influente para la Coagulación mecánica y diferentes dosis de Sulfato de aluminio como  $Al_2(SO_4)_3$  . (CNA. "Saneamiento del Valle de México", 1994.)

| COAGULANTE<br>$Al_2(SO_4)_3$ [mg/L] | TURBIEDAD[UTN]               |      |      | pH         |      |      | POTENCIAL[mV]  |       |         |
|-------------------------------------|------------------------------|------|------|------------|------|------|----------------|-------|---------|
|                                     | PROMEDIO                     | MÁX. | MIN. | PROMEDIO   | MÁX. | MIN. | PROMEDIO       | MÁX.  | MIN.    |
| 0                                   | 279                          | 373  | 181  | 7.72       | 9.34 | 5.45 | -26.53         | 32.60 | -112.20 |
| 41                                  | 109                          | 151  | 27   | 7.36       | 7.86 | 6.03 | 18.76          | 48.50 | -6.70   |
| 51                                  | 84                           | 112  | 67   | 6.73       | 7.78 | 5.75 | 38.48          | 69.20 | -2.30   |
| 56                                  | 88                           | 123  | 59   | 7.00       | 7.81 | 5.65 | 34.63          | 72.80 | -4.50   |
| 66                                  | 92                           | 123  | 59   | 6.93       | 7.70 | 5.66 | 38.85          | 75.30 | 2.40    |
| COAGULANTE<br>$Al_2(SO_4)_3$ [mg/L] | CONDUCTIVIDAD [ $\mu$ ms/cm] |      |      | STD [g/l]  |      |      | SST [mg/L]     |       |         |
|                                     | PROMEDIO                     | MÁX. | MIN. | PROMEDIO   | MÁX. | MIN. | PROMEDIO       | MÁX.  | MIN.    |
| 0                                   | 2690                         | 4710 | 1350 | 1.36       | 2.70 | 0.97 | 128            | 158   | 100     |
| 41                                  | 273                          | 3111 | 2100 | 1.37       | 1.56 | 1.06 | 38             | 44    | 26      |
| 51                                  | 2495                         | 3040 | 2150 | 1.25       | 1.52 | 1.06 | 29             | 40    | 20      |
| 56                                  | 2653                         | 3110 | 2070 | 1.33       | 1.56 | 1.03 | 27             | 32    | 22      |
| 66                                  | 2666                         | 3110 | 2090 | 1.34       | 1.56 | 1.04 | 30             | 38    | 22      |
| COAGULANTE<br>$Al_2(SO_4)_3$ [mg/L] | SSV [mg/L]                   |      |      | SSF [mg/L] |      |      | DQO TOT [mg/L] |       |         |
|                                     | PROMEDIO                     | MÁX. | MIN. | PROMEDIO   | MÁX. | MIN. | PROMEDIO       | MÁX.  | MIN.    |
| 0                                   | 79                           | 168  | 52   | 50         | 86   | 4    | 413            | 498   | 288     |
| 41                                  | 29                           | 36   | 22   | 9          | 12   | 4    | 259            | 293   | 218     |
| 51                                  | 23                           | 30   | 18   | 7          | 10   | 0    | 232            | 261   | 192     |
| 56                                  | 21                           | 26   | 14   | 6          | 10   | 2    | 242            | 284   | 215     |
| 66                                  | 23                           | 30   | 16   | 7          | 12   | 2    | 241            | 274   | 193     |

**FIG 13 REMOCIÓN DE TURBIEDAD, SST Y DQO<sub>T</sub> CON COAGULACIÓN MECANICA Y Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>**



Se marcaron líneas de tendencia para interpretar los puntos en dónde se puede observar que la mayor remoción de UTN, DQO y SST, se da con 51 mg/L de Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> . Como se puede observar para una dosis de sulfato de aluminio (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>) de 51 mg/L se obtiene una considerable remoción en promedio de : Turbiedad (73 %), SST (84 %) y DQO<sub>T</sub> (48 %) ; además de una apreciable disminución de conductividad que se encuentra fuera de los niveles máximos permitidos por la norma (NOM-CCA-032-ECOL/1993 con un valor de 2000 mmhos) . El pH con un valor promedio de pH = 7.96 está dentro del rango que marca la Legislación Ambiental (pH de 8.5 a 6.5) . Con el Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> se remueve turbiedad, pero no más que con el hidróxido de calcio Ca(OH)<sub>2</sub> .

En las siguientes tablas se presentan datos del influente o agua cruda y la remoción que se logra con el tratamiento Primario Avanzado con Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> .

La TABLA 13 muestra los resultados de la calidad obtenida en el agua cruda o influente en la etapa experimental que comprende de 20/12/1994 a 16/02/1995 . (Planta de Ecatepec)

(CNA. "Saneamiento del Valle de México", 1994.) .

| PARÁMETRO               | PROMEDIO | MÁXIMO | MÍNIMO  |
|-------------------------|----------|--------|---------|
| TURBIEDAD [UTN]         | 305      | 425    | 177     |
| pH                      | 7.96     | 9.25   | 7       |
| POTENCIAL [mV]          | -25.53   | 25     | -106.60 |
| CONDUCTIVIDAD [mmhos]   | 4330     | 3040   | 2120    |
| SDT [g/L]               | 1.43     | 2.33   | 1.06    |
| SST [mg/L]              | 184      | 244    | 136     |
| SSV [mg/L]              | 97       | 128    | 66      |
| SSF [mg/L]              | 90       | 116    | 68      |
| DQO <sub>T</sub> [mg/L] | 450      | 519    | 335     |

### 7.1.3 Evaluación del Hidróxido de Calcio como Coagulante .

La aplicación de cal (tipo comercial) a dosis de 200 mg/L, permite obtener una eficiencia del 80% en remoción de Turbiedad, de 75% en remoción de SST en las aguas del Gran Canal y en la Planta Ecatepec eficiencias del 50% en remoción de Turbiedad .

Cabe destacar que a éstas dosis el pH se incrementa a 9.5 debido al empleo de cal, valor que rebasa la norma NOM-CCA-032-ECOL/1993 .

Los principales resultados evaluados para el efluente con el empleo de Hidróxido de calcio sin ningún floculante son mostrados en la **TABLA 14** así como el efecto de la coagulación mecánica .

| Ca(OH) <sub>2</sub><br>[mg/L] | TURBIEDAD<br>[UTN] | pH   | POTENCIAL<br>[mV] | CONDUCTIVIDAD<br>[mmhos/cm] | STD<br>[g/L] | SST<br>[mg/L] | SSV<br>[mg/L] | SSF<br>[mg/L] |
|-------------------------------|--------------------|------|-------------------|-----------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| 0                             | 278                | 7.36 | 2.5               | 1610                        | 0.75         | 61            | 18            | 43            |
| 25                            | 167                | 7.83 | -11.5             | 1630                        | 0.8          | 74            | 30            | 24            |
| 50                            | 174                | 8.24 | -33.8             | 1620                        | 0.49         | 61            | 42            | 19            |
| 75                            | 168                | 8.46 | -46.2             | 1590                        | 0.77         | 50            | 49            | 1             |
| 100                           | 159                | 8.75 | -61.1             | 1620                        | 0.74         | 108           | 57            | 51            |
| 125                           | 135                | 8.89 | -69               | 1610                        | 0.75         | 72            | 33            | 19            |
| 150                           | 119                | 8.98 | -73.4             | 1570                        | 0.79         | 80            | 33            | 27            |
| 175                           | 46                 | 9.21 | -86               | 1530                        | 0.79         | 38            | 24            | 14            |
| 200                           | 28.1               | 9.44 | -97.7             | 1510                        | 0.76         | 27            | 15            | 12            |
| 275                           | 21.2               | 9.53 | -102.8            | 1540                        | 0.77         | 22            | 15            | 7             |
| 300                           | 22.8               | 9.54 | -103.3            | 1420                        | 0.73         | 10            | 5             | 5             |

**TABLA 14** Calidad del efluente para la coagulación mecánica y diferentes dosis de hidróxido de calcio (CNA. "Saneamiento del Valle de México", 1994) .

Como se puede observar para una dosis de Hidróxido de calcio Ca(OH)<sub>2</sub> de 200 a 250 mg/L se obtiene una considerable remoción en promedio de : Turbiedad (91 %), SST (85 %) y DQO<sub>T</sub> (57 %) ; además una apreciable disminución de conductividad, pero también un aumento fuera de los niveles de la norma en el pH .

Al hacer una comparación con la dosis óptima encontrada del floculante prosifloc A252 y con Nalcomex en dosis de 0.1, 0.2 y 0.4 (estas dosis fueron evaluadas en estudios anteriores elaborados por el Instituto de Ingeniería) como se muestra en la **TABLA 15** .

| PARÁMETRO          | SIN FLOCULANTE<br>[200 mg/L de<br>Ca(OH) <sub>2</sub> ] | PROSIFLOC A252 |            |            | NALCOMEX   |            |            |
|--------------------|---|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                    |   | 0.4 [mg/L]     | 0.2 [mg/L] | 0.1 [mg/L] | 0.4 [mg/L] | 0.2 [mg/L] | 0.1 [mg/L] |
| TURBIEDAD [UTN]    | 28  | 38             | 55         | 92         | 41         | 44         | 32         |
| pH                 | 9.4   | 9.6            | 10.3       | 8.6        |            | 9          | 8.5        |
| SST [mg/L]         | 27  | 47             | 59         | 28         | 247        | 51         | 26         |
| DQOT [mg/L]        | -   | 246            | 241        | 307        | 272        | 272        | 288        |
| CONDUCTIVIDAD [mm] | 1540  | 2670           | 2240       | 3040       | 2450       | 2540       | 2950       |

**TABLA 15** Calidad obtenida en el efluente con dosis recomendadas de Ca(OH)<sub>2</sub> 250 mg/l y de floculante (CNA. "Saneamiento del Valle de México", 1994.) .

De los resultados se concluye que la concentración óptima recomendada de hidróxido de calcio Ca(OH)<sub>2</sub> es de 200 a 250 mg/L para una mejor remoción de SST, turbiedad y DQO así como un considerable incremento de pH y notable disminución en la conductividad para el caso de los floculantes .

Las dosis recomendables de cada uno de los coagulantes y floculantes estudiados se encuentran en la **TABLA 16** .

| CONDICIONES         | DOSIS,<br>mg/L | POLIELECTRÓLITO | DOSIS,<br>mg/L | UTN<br>efluente | SST<br>efluente, mg/L |
|---------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------------|
| Cloruro férrico     | 50             | Nalcomex        | 0.4            | 164             | 53                    |
|                     |                | Prosifloc       | 0.4            | 187             | 68                    |
| Sulfato de aluminio | 100            | Nalcomex        | 0.4            | 111             | 44                    |
|                     |                | Prosifloc       | 0.4            | 145             | 65                    |
| Cal                 | 200            | Nalcomex        | 0.4            | 35              | 38                    |
|                     |                | Prosifloc       | 0.4            | 40              | 42                    |

**TABLA 16** . Resultados encontrados con los diversos coagulantes y los mejores polielectrólitos ( Como alúmina Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·18H<sub>2</sub>O CNA. "Saneamiento del Valle de México", 1994.) .

COPIA DE LA BIBLIOTECA  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Las eficiencias para los diversos floculantes con los mejores polielectrólitos. Es importante destacar que al aumentar las dosis de cloruro férrico por encima de 50 mg/L se incrementaba el contenido de sólidos pequeños en suspensión, efecto que fue observado en varias ocasiones .

Como ya se ha visto en el estudio que el coagulante que presenta mejores resultados es la cal, seguida por el Sulfato de aluminio y para los floculantes con mejores resultados son los polielectrólitos Nalcomex y Prosifloc A252 ; en la siguiente tabla se presentan las dosis recomendadas de los coagulantes y los floculantes de mejores resultados además de los respectivos valores de la norma (TABLA 17) .

| Parametro  | pH        | Conductividad<br>[µmhos/cm] | SST<br>[mg/L] | DQO <sub>r</sub><br>[mg/L] | Turbiedad<br>[UTN] |
|--|-----------|-----------------------------|---------------|----------------------------|--------------------|
| Valores de NOM   | 6.5 a 8.5 | 200                         | 120           | -                          | -                  |
| Agua Cruda Gran Canal  | 7.04      | 1466                        | 108           | -                          | 123                |
| Agua Cruda Planta de Ecatepec  | 8.05      | 3848                        | 167           | 452                        | 281                |
| Coagulación Mecánica   | 7.75      | 2704                        | 131           | 428                        | 263                |
| Hidróxido de calcio<br>(200 mg/L Ca(OH) <sub>2</sub> +<br>0.4 mg/L de Prosifloc A252)  | 9.6       | 2670                        | 47            | 246                        | 38                 |
| Sulfato de aluminio<br>(100 mg/L Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·18 H <sub>2</sub> O +<br>0.4 mg/L de Prosifloc A252) | 7.24      | 2890                        | 43            | 260                        | 122                |
| Cloruro férrico<br>(50 mg/L FeCl <sub>3</sub> ·6 H <sub>2</sub> O +<br>0.4 mg/L de Nalcomex)   | 7.3       | 2709                        | 75            | 347                        | 175                |

**TABLA 17 .** Parámetros comparativos para las mejores dosis de coagulante y floculantes representativos de acuerdo a la NOM-CCA-032-ECOL/1993 (CNA. "Saneamiento del Valle de México", 1994) .

#### 7.1.4 Determinación de metales pesados

La determinación de metales pesados presentes tanto en el agua sin tratamiento, como en el agua ya tratada es parte del presente estudio .

Los metales cobre, cadmio, plomo y arsénico determinados como parte de la metodología experimental, presentan características de toxicidad que en la evaluación de la calidad del agua son variables muy relevantes, particularmente cuando se pretende reutilizar el efluente final .

Durante el mes de febrero de 1995 se obtuvieron muestras de agua cruda y se llevaron a cabo pruebas de jarras con tres diferentes coagulantes . El primer grupo de muestras fueron tratadas con sulfato de aluminio en concentración de 50 mg/L y polímero Zwitter No.2 en 0.2 mg/L . Un segundo grupo de muestras se trató con hidróxido de calcio en concentración de 250 mg/L y polímero Zwitter, de 0.2 mg/L . El tercer grupo de muestras fue tratado únicamente con 250 mg/L de hidróxido de calcio .

En la **TABLA 18** se presentan los resultados obtenidos en la determinación de las concentraciones de estos metales por espectrofotometría de absorción atómica . (Perkin Elmer)

Podemos observar en la tabla, que los valores de concentración más altos los presenta el plomo, tanto en el agua sin tratamiento, como en el agua ya tratada . Los valores más bajos los presenta el arsénico . El cadmio y el cobre presentan valores similares .

De acuerdo a estos resultados, el tratamiento primario avanzado que remueve los metales en mayor proporción es el tratamiento con cal y polímero zwitteriónico, en éste caso sólo se le hicieron análisis de metales pesados a los polielectrolitos Zwitteriónicos No. 2, 3 y 4. Se puede observar que cuando se aplicó el polímero, se obtuvieron resultados ligeramente mejores en cuanto a la remoción de metales.

## CAPITULO VIII

---

### ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Como se puede observar en los resultados anteriores ; se determinó que el coagulante más eficiente es el Hidróxido de Calcio o cal seguido por el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  y  $\text{FeCl}_3$  .

Dadas las condiciones sépticas de las aguas de Ecatepec, el  $\text{FeCl}_3$  no fué aplicable por la formación de un color negro producto de la combinación del fierro con los sulfuros para formar  $\text{FeS}$ , con el que aumentaba la turbiedad y no permitía tener visibilidad alguna de los flóculos formados, además de su alta conductividad ; por lo cuál se eliminó por completo desde el primer periodo de muestreo .

El proceso consistió principalmente en agregar  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  como coagulante a diferentes dosis y después de varios análisis se determinó que la dosis óptima era en 250 mg/L . Con ésta dosis se logró una turbiedad mínima y el pH no se elevaba a más de 9.5-9.8 aprox., aunque ésto tampoco es recomendable para el tratamiento microbiológico y además rebasa el rango de pH aceptado por la NOM-CCA-032-ECOL/1993 que es de 8.5 . Sin embargo; este coagulante se adoptó como el mejor, ya que posteriormente se piensa adaptar un proceso de acidificación con el cuál el pH se reduzca alrededor de 7 . Además de que comparado con los resultados de los otros coagulantes se obtuvo una cantidad similar de lodos .

Se observó que con tan sólo agregar  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se logra más del 50% de la efectividad total del tratamiento, la otra parte se logra por el polielectrolito y por un aspecto que es indispensable cuidar que son los gradientes de velocidad, es decir, la agitación lenta y la rápida, los cuáles durante la experimentación, también fueron optimizados para lograr eficiencias más altas y que permitan la homogeneización de la muestra así como la formación de un flóculo más compacto y más estable para el manejo posterior de lodos .

Tomando en cuenta los datos obtenidos se pudo concluir que al incrementar la dosis de polímero se tienen resultados adversos a los esperados con respecto a la turbiedad .

El estudio comparativo entre dicho polímero y los comerciales Prosifloc y Nalcomex (ambos aniónicos), se hizo con respecto a : Remoción de Turbiedad (UTN), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Sedimentables (SS), Sólidos Disueltos Totales (STD), Nitrógeno Amoniacal ( $\text{N-NH}_3$ ), Metales pesados como Pb, As, Cd y Cu ; medición de conductividad, Potencial, pH, así como las suficientes pruebas de jarras para encontrar las dosis recomendadas tanto de coagulante como de floculante y los gradientes de velocidad, con los cuáles se

obtuvieran las mejores condiciones en la formación del floculo, en cuanto a grado de compactación y tamaño .

Se lograron eficiencias promedio de :

| Coagulante + Polielectrolito        | UTN | SST | DQO |
|-------------------------------------|-----|-----|-----|
| Ca(OH) <sub>2</sub> + Zwitteriónico | 80% | 86% | 38% |
| Ca(OH) <sub>2</sub> + Prosifloc     | 57% | 92% | 55% |
| Ca(OH) <sub>2</sub> + Nalcomex      | 65% | 92% | 42% |

En la tabla anterior se puede observar que el polielectrolito zwitteriónico compite con los polielectrolitos comerciales, sobre todo en cuanto a remoción de Turbiedad, cuando se utilizan 250 mg/L de Ca(OH)<sub>2</sub> y 0.1 mg/L de cada polielectrolito zwitteriónico, además de que la dosis óptima de remoción de los polielectrolitos comerciales no es de 0.1 sino de 0.4 mg/L lo cual rebasa la cantidad utilizada por 3 veces más y esto repercute en los costos de operación y además en el equilibrio de los suelos .

En cuanto a remoción de metales pesados tales como Arsénico, Cobre, Cadmio y Plomo, no se cuentan con valores significativos en éstas aguas en realidad ni siquiera sobrepasan la NOM-CCA-032-ECOL/1993 .

A continuación se presenta una tabla en donde se resume la eficiencia promedio de remoción para metales pesados utilizando como coagulante Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> y Ca(OH)<sub>2</sub> en 51 y 250 mg/L respectivamente y 0.1 mg/L de polielectrolito Zwitteriónico No. 3 .

| Metal | Ca(OH) <sub>2</sub> + Zwitteriónico | Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> + Zwitteriónico |
|-------|-------------------------------------|---|
| Pb    | 30%                                 | 20%   |
| Cd    | 40%                                 | 12%   |
| Cu    | 96%                                 | 66.2%   |
| As    | 30%                                 | 20%   |

Tabla de eficiencias de remoción de metales pesados

Curiosamente, estas eficiencias tan altas en SST, DQO y UTN, se lograron cuando una vez agregado el coagulante se dejaba reposar 10 min antes de iniciar la prueba de jarras, ya que se daba tiempo a que las partículas comenzaran la sedimentación por gravedad, con lo que el proceso se hacía más eficiente .

En cuanto a remoción de Nitrógeno como N-NH<sub>3</sub> , tal parece que conforme avanza el curso del tratamiento en la prueba de jarras, al tener contacto con el agua y sus diferentes sustancias disueltas, el polímero se descompone dando lugar a reacciones con los grupos N-óxidos del polielectrolito, con las cuales se dan lecturas de Nitrógeno Amoniacal (N-NH<sub>3</sub>) más altas después , que antes de iniciar el tratamiento .

**APARTADO No. 1**

**TABLAS DE RESULTADOS**

## APARTADO No.1

### TABLAS REPRESENTATIVAS DEL TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO, A NIVEL LABORATORIO .

**TABLA 18. Concentraciones de los metales pesados Cu, Cd, Pb y As en el agua residual sin tratamiento y después del tratamiento primario avanzado utilizando el Zwitt.No.2, determinados por absorción atómica .**

|  | Concentración del metal en mg/L |              |              |              |
|--|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|
|  | As                              | Cd           | Cu           | Pb           |
| <b>Influente</b>                                       | 0.0105                          | 0.026        | 0.115        | 0.634        |
| "  | 0.0080                          | 0.028        | 0.067        | 0.515        |
| "  | 0.0085                          | 0.030        | 0.069        | 0.480        |
| "  | 0.0092                          | 0.032        | 0.069        | 0.498        |
| "  | 0.0095                          | 0.031        | 0.072        | 0.555        |
| "  | 0.0088                          | 0.034        | 0.067        | 0.600        |
| "  | 0.0089                          | 0.036        | 0.064        | 0.475        |
| "  | 0.0091                          | 0.037        | 0.054        | 0.541        |
| "  | 0.0113                          | 0.035        | 0.053        | 0.498        |
| "  | 0.0121                          | 0.039        | 0.087        | 0.474        |
| "  | 0.0109                          | 0.039        | 0.065        | 0.475        |
| "  | 0.0116                          | 0.036        | 0.145        | 0.188        |
| <b>PROMEDIO</b>  | <b>0.010</b>                    | <b>0.034</b> | <b>0.071</b> | <b>0.520</b> |
| <b>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> + P*</b> | 0.0067                          | 0.032        | 0.024        | 0.180        |
| "  | 0.0092                          | 0.032        | 0.039        | 0.151        |
| "  | 0.0103                          | 0.029        | 0.022        | 0.115        |
| "  | 0.0079                          | 0.030        | 0.028        | 0.120        |
| "  | 0.0078                          | 0.029        | 0.020        | 0.117        |
| "  | 0.0082                          | 0.028        | 0.014        | 0.115        |
| <b>PROMEDIO</b>  | <b>0.008</b>                    | <b>0.030</b> | <b>0.024</b> | <b>0.133</b> |

P\* Polímero Zwitt 0.2 mg/L

...Continuación . TABLA No.18

|                              | Concentración del metal en mg/L |              |              |              |
|------------------------------|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|
|                              | As                              | Cd           | Cu           | Pb           |
| <b>Ca(OH)<sub>2</sub>+P*</b> | 0.0063                          | 0.028        | 0.015        | 0.086        |
| "                            | 0.0079                          | 0.030        | 0.002        | 0.107        |
| "                            | 0.0071                          | 0.038        | 0.002        | 0.075        |
| "                            | 0.0080                          | 0.031        | 0.044        | 0.111        |
| "                            | 0.0057                          | 0.052        | 0.001        | 0.146        |
| "                            | 0.0041                          | 0.002        | 0.001        | 0.108        |
| "                            | 0.0064                          | 0.002        | 0.002        | 0.154        |
| "                            | 0.0059                          | 0.006        | 0.001        | 0.147        |
| "                            | 0.0054                          | 0.005        | 0.002        | 0.170        |
| "                            | 0.0047                          | 0.002        | 0.001        | 0.176        |
| "                            | 0.0064                          | 0.011        | 0.002        | 0.212        |
| "                            | 0.0099                          | 0.010        | 0.007        | 0.184        |
| <b>PROMEDIO</b>              | <b>0.007</b>                    | <b>0.020</b> | <b>0.003</b> | <b>0.140</b> |
| <b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>    | 0.0112                          | 0.010        | 0.002        | 0.273        |
| "                            | 0.0106                          | 0.009        | 0.009        | 0.292        |
| "                            | 0.0079                          | 0.007        | 0.005        | 0.257        |
| "                            | 0.0098                          | 0.006        | 0.004        | 0.264        |
| "                            | 0.0091                          | 0.003        | 0.009        | 0.300        |
| "                            | 0.0081                          | 0.006        | 0.003        | 0.307        |
| "                            | 0.0085                          | 0.002        | 0.008        | 0.314        |
| "                            | 0.0088                          | 0.001        | 0.004        | 0.300        |
| "                            | 0.0081                          | 0.001        | 0.006        | 0.317        |
| "                            | 0.0098                          | 0.001        | 0.007        | 0.312        |
| "                            | 0.0066                          | 0.001        | 0.010        | 0.344        |
| "                            | 0.0081                          | 0.002        | 0.009        | 0.425        |
| <b>PROMEDIO</b>              | <b>0.009</b>                    | <b>0.004</b> | <b>0.006</b> | <b>0.310</b> |

TABLA No.18 P\* Polimero Zwitter 0.2 mg/L

**TABLA 19.** Concentraciones de los metales pesados Cu, Cd, Pb y As en el agua residual sin tratamiento y después del tratamiento primario avanzado, determinados por absorción atómica con los polielectrolitos Zwitteriónicos No.3 y No.4.

|                      | Concentración del metal en mg/L |                      |                      |       |
|----------------------|---------------------------------|----------------------|----------------------|-------|
|                      | As                              | Cd                   | Cu                   | Pb    |
| <b>Influente</b>     | 0.0085                          | 0.026                | 0.056                | 0.099 |
| "                    | 0.0098                          | 7.7*10 <sup>-3</sup> | 0.099                | 0.099 |
| "                    | 0.0113                          | 5.5*10 <sup>-3</sup> | 0.063                | 0.132 |
| "                    | 0.0097                          | 5.5*10 <sup>-3</sup> | 0.096                | 0.121 |
| <b>PROMEDIO</b>      | 0.0098                          | 0.0071               | 0.083                | 0.113 |
| <b>Ca(OH)2 + Zw3</b> | 0.0066                          | 5.5*10 <sup>-3</sup> | 5.5*10 <sup>-3</sup> | 0.099 |
| "                    | 0.0085                          | 3.3*10 <sup>-3</sup> | 1.1*10 <sup>-3</sup> | 0.099 |
| "                    | 0.0102                          | 5.5*10 <sup>-3</sup> | 5.5*10 <sup>-3</sup> | 0.121 |
| "                    | 0.0115                          | 4.4*10 <sup>-3</sup> | 1.1*10 <sup>-3</sup> | 0.132 |
| "                    | 0.0126                          | 5.5*10 <sup>-3</sup> | 5.5*10 <sup>-3</sup> | 0.121 |
| "                    | 0.0092                          | 4.4*10 <sup>-3</sup> | 0.0143               | 0.121 |
| <b>PROMEDIO</b>      | 0.0098                          | 0.0047               | 0.0055               | 0.116 |
| <b>Ca(OH)2 + Zw4</b> | 0.0085                          | 4.4*10 <sup>-3</sup> | 0.0726               | 0.121 |
| "                    | 0.0083                          | 6.6*10 <sup>-3</sup> | 9.9*10 <sup>-3</sup> | 0.121 |
| "                    | 0.0086                          | 6.6*10 <sup>-3</sup> | 0.0286               | 0.132 |
| "                    | 0.0087                          | 6.6*10 <sup>-3</sup> | 0.011                | 0.110 |
| "                    | 0.0087                          | 6.6*10 <sup>-3</sup> | 0.011                | 0.121 |
| <b>PROMEDIO</b>      | 0.0086                          | 0.0154               | 0.027                | 0.121 |
| <b>Ca(OH)2</b>       | 0.0083                          | 6.6*10 <sup>-3</sup> | 0.0165               | 0.132 |
| "                    | 0.0046                          | 4.4*10 <sup>-3</sup> | 4.4*10 <sup>-3</sup> | 0.121 |
| "                    | 0.0092                          | 7.7*10 <sup>-3</sup> | 6.6*10 <sup>-3</sup> | 0.11  |
| "                    | 0.0109                          | 5.5*10 <sup>-3</sup> | 9.9*10 <sup>-3</sup> | 0.121 |
| "                    | 0.0090                          | 4.4*10 <sup>-3</sup> | 0.0121               | 0.132 |
| <b>PROMEDIO</b>      | 0.0100                          | 0.0058               | 0.01                 | 0.123 |

### 7.1.5 Determinación de Nitrógeno Amoniacal . N-NH3 (mg/L)

| Fecha       | Agua Cruda | Ca(OH) <sub>2</sub> | Ca(OH) <sub>2</sub> + Zwitt. No. 2 | Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> + Zwitt. No. 2 | Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | Ca(OH) <sub>2</sub> + Prosifloc | Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> + Prosifloc |
|-------------|------------|---------------------|------------------------------------|--|---|---------------------------------|---|
| 27 Feb 95   | 12         | 29.3                | 31                                 | -----  | -----   | -----                           | -----   |
| 2 Marzo 95  | 28.3       | 24.4                | 23.5                               | -----  | 27  | -----                           | 26.32   |
| 6 Marzo 95  | 26.52      | 26.5                | 25                                 | -----  | 23  | 22                              | -----   |
| 8 Marzo 95  | 24.2       | 22.4                | 8.8                                | -----  | 23.7  | 24.6                            | 24.64   |
| 9 Marzo 95  | 27.3       | 25.4                | 26                                 | 26   | 26  | -----                           | 28  |
| 13 Marzo 95 | 9.1        | 27.4                | 23.7                               | 26   | -----   | -----                           | 5.8   |
| 14 Marzo 95 | 18.5       | 24                  | 29.12                              | 21.3   | -----   | -----                           | 13.8  |
| 16 Marzo 95 | 29.7       | 26.7                | 27.4                               | -----  | -----   | -----                           | 29.5  |
| 22 Marzo 95 | 29         | 27                  | 28.1                               | -----  | -----   | -----                           | 31.36   |
| 23 Marzo 95 | 31         | 29                  | 29.7                               | -----  | -----   | -----                           | 33  |
| 24 Marzo 95 | 26.5       | 30.2                | 27.4                               | -----  | -----   | -----                           | 34  |
| 28 Marzo 95 | 29.6       | 27.6                | 25.3                               | -----  | -----   | -----                           | -----   |
| 29 Marzo 95 | 28.4       | 29.4                | 29.3                               | -----  | -----   | -----                           | 27.5  |
| 31 Marzo 95 | 30         | -----               | -----                              | -----  | -----   | -----                           | -----   |
| Promedio    | 25         | 26.9                | 25.7                               | 24.4   | 24.9  | 25.6                            | 25.4  |

TABLA No.20 . Determinación de Nitrógeno Amoniacal .

## CARACTERIZACION DEL AGUA INFLUENTE

Tabla No.21

| PARAMETRO                             | PROMEDIO         | MINIMO         | MAXIMO           |
|---------------------------------------|------------------|----------------|------------------|
| Sólidos suspendidos totales (mg/L)    | 187              | 92             | 260              |
| Sólidos suspendidos volátiles (mg/L)  | 84               | 38             | 122              |
| Sólidos suspendidos fijos (mg/L)      | 61               | 10             | 154              |
| DQO total (mg/L)                      | 478              | 519            | 633              |
| DQO soluble (mg/L)                    | 258              | 181            | 494              |
| Nitrógeno total kjheldal (mg/L)       | 45               | 36             | 60               |
| Nitrógeno amoniacal (mg/L)            | 32               | 24             | 37               |
| Fósforo total (mg/L)                  | 36               | 15             | 57               |
| Coliformes fecales (NMP/100 mL DGCOH) | $2.4 \cdot 10^7$ | $2 \cdot 10^6$ | $1.6 \cdot 10^8$ |
| Huevos de Helmintos/L                 | 177              | 88             | 264              |
| pH                                    | 7.87             | 7.21           | 8.7              |
| Conductividad eléctrica (mhos/cm)     | 2362             | 1693           | 3188             |
| Turbiedad(UTN)                        | 277              | 144            | 397              |
| Potencial redox (mV)                  | -25.53           | -106.6         | 25               |

En la **Tabla No.21** se presenta la variación diaria durante el mes de Enero de 1994 del influente en relación con: Sólidos suspendidos totales y turbiedad . De la misma manera lo referente a DQO total .

Los datos presentados anteriormente fueron recopilados de los análisis practicados diariamente del mes de Enero al mes de Febrero de 1995 en el Instituto de Ingeniería por la DGCOH y por CNA .

**TABLA No.22 (Encro de 1995.)**

En la siguiente tabla se muestra la calidad obtenida en el influente para los siguientes parámetros, con respecto a dos coagulantes : con 100 mg/L  $Al_2(SO_4)_3$  y 200 mg/L de  $Ca(OH)_2$  y la adición de 0.6 mg/L de polielectrolito Zwitteriónico No.1 .

| PARAMETRO                     | INFLUENTE    |       |       | HIDROXIDO DE CALCIO (200 mg/L) y 0.6 mg/L de POLIELECTROLITO ZWITTERIONICO No.1 |       |       | SULFATO DE ALUMINIO (100 mg/L) Y 0.6 mg/L de POLIELECTROLITO ZWITTERIONICO No.1 |       |        |
|-------------------------------|--------------|-------|-------|---|-------|-------|---|-------|--------|
|                               | prom         | máx.  | min.  | prom.   | máx.  | min.  | prom.   | máx.  | min.   |
| Sólidos Susp. Totales, (mg/L) | 187          | 260   | 92    | 22  | 26    | 21    | 32  | 34    | 31     |
| Eficiencia %                  |              |       |       | 88.2  |       |       | 82  |       |        |
| Turbiedad ,UTN                | 277          | 425   | 95.1  | 19.5  | 21    | 18    | 131   | 103   | 100    |
| Eficiencia %                  |              |       |       | 46.5  |       |       | 52  |       |        |
| DQO Total,(mg/L)              | 482          | 614   | 401   | 348.5   | 361   | 336   | 237   | 239   | 235    |
| Eficiencia %                  |              |       |       | 29  |       |       | 52  |       |        |
| pH                            | 8.0          | 9.2   | 7.0   | 9.04  | 9.24  | 8.84  | 6.96  | 6.98  | 6.94   |
| Conductividad (mS/cm)         | 2.7          | 3.4   | 1.9   | 2.69  | 2.70  | 2.32  | 2.27  | 2.29  | 2.25   |
| STD,(mg/L)                    | 1.36         | 1.9   | 0.97  | 1.34  | 1.36  | 1.16  | 1.14  | 1.16  | 1.12   |
| Potencial,(mV)                | -17          | 25    | -61.2 | -25.35  | -33.9 | -16.8 | 65.9  | 66.1  | 65.7   |
| Sólidos Sedim. (ml/L)         | No sedimenta |       |       | 45  |       |       | 15  |       |        |
| <b>Metales Pesados</b>        |              |       |       |   |       |       |   |       |        |
| As                            | 0.010        | 0.011 | 0.008 | *   | *     | *     | 0.008   | 0.010 | 0.0067 |
| Eficiencia %                  |              |       |       |   |       |       | 20  |       |        |
| Cu                            | 0.071        | 0.145 | 0.053 | *   | *     | *     | 0.071   | 0.145 | 0.053  |
| Eficiencia %                  |              |       |       |   |       |       | 66  |       |        |
| Cd                            | 0.034        | 0.039 | 0.026 | *   | *     | *     | 0.034   | 0.039 | 0.026  |
| Eficiencia %                  |              |       |       |   |       |       | 12  |       |        |
| Pb                            | 0.520        | 0.600 | 0.188 |   |       |       | 0.520   | 0.6   | 0.188  |
| Eficiencia %                  |              |       |       | *   | *     | *     | 75  |       |        |

\* No se hicieron las determinaciones para 200 mg/L de  $Ca(OH)_2$ ,

**PRINCIPALES RESULTADOS . ( Enero de 1995)**

**TABLA No.23**

En la siguiente tabla se muestra la calidad obtenida en el influente para los siguientes parámetros, con la adición de 230 y 300 mg/L de Ca(OH)<sub>2</sub> como coagulante y polielectrolito zwitteriónico No. 1 .

| PARAMETRO                    | INFLUENTE |      |       | HIDROXIDO DE CALCIO (230 mg/L) y 0.2 mg/L de POLIELECTROLITO ZWITTERIONICO No. 1 |        |       | HIDROXIDO DE CALCIO(300 mg/L) y 0.25 mg/L de POLIELECTROLITO ZWITTERIONICO No. 1 |       |       |
|------------------------------|-----------|------|-------|--|--------|-------|--|-------|-------|
|                              | prom      | máx. | min.  | prom.  | máx.   | min.  | prom.  | máx.  | min.  |
| Sólidos Susp. Totales (mg/L) | 187       | 260  | 92    | 45   | 49     | 44    | 36   | 42    | 30    |
| Eficiencia %                 |           |      |       | 76   |        |       | 81   |       |       |
| Turbiedad (UTN)              | 277       | 425  | 95.1  | 38.7   | 45     | 37    | 16   | 71    | 16    |
| Eficiencia %                 |           |      |       | 86   |        |       | 94   |       |       |
| DQO Total (mg/L)             | 482       | 614  | 401   | 280  | 296    | 235   | 269.5  | 283   | 256   |
| Eficiencia %                 |           |      |       | 42   |        |       | 44   |       |       |
| pH                           | 8.0       | 9.2  | 7.0   | 8  | 8.6    | 8.44  | 9.22   | 9.44  | 9.00  |
| Conductividad (mS/cm)        | 2.7       | 3.4  | 1.9   | 2.64   | 2.76   | 2.24  | 2.5  | 2.51  | 2.48  |
| STD (mg/L)                   | 1.36      | 1.9  | 0.97  | 1.36   | 1.42   | 1.30  | 1.49   | 1.34  | 1.25  |
| Potencial (mV)               | -17       | 25   | -61.2 | -28.7  | -18.00 | -32.3 | -25.7  | -23.9 | -30.1 |
| Sólidos Sedim. (mg/L)        | -         |      |       | 47   |        |       | 21   |       |       |

**PRINCIPALES RESULTADOS . (Enero de 1995)**  
**TABLA No. 24**

En la siguiente tabla se muestra la calidad obtenida en el influente para los siguientes parámetros, con respecto al coagulante ; con 250 mg/L de Ca(OH)<sub>2</sub> y la adición de 0.2 mg/L de polielectrolito zwitteriónico No.1 .

| PARAMETRO                     | INFLUENTE O AGUA CRUDA |      |       | HIDROXIDO DE CALCIO (250 mg/L) |       |        | HIDROXIDO DE CALCIO (250 mg/L) y 0.2 mg/L. de POLIELECTROLITO ZWITTERIONICO No. 1 |       |        |
|-------------------------------|------------------------|------|-------|--------------------------------|-------|--------|---|-------|--------|
|                               | prom.                  | máx. | min.  | prom.                          | máx.  | min.   | prom.   | máx.  | min.   |
| Sólidos Susp. Totales, (mg/L) | 158                    | 20   | 148   | 43.5                           | 54    | 34     | 43.5  | 80    | 20     |
| Eficiencia %                  |                        |      |       | 73                             |       |        | 73  |       |        |
| Turbiedad ,UTN                | 203.8                  | 383  | 95.1  | 22.35                          | 27.9  | 19.2   | 32.47   | 66.1  | 14.2   |
| Eficiencia %                  |                        |      |       | 86                             |       |        | 68  |       |        |
| DQO Total, (mg/L)             | 482                    | 614  | 401   | 302.5                          | 382   | 216    | 250   | 270   | 208    |
| Eficiencia %                  |                        |      |       | 38                             |       |        | 48  |       |        |
| pH                            | 8.0                    | 9.2  | 7.0   | 9.2                            | 9.4   | 9.0    | 8.96  | 10.99 | 8      |
| Conductividad (mS/cm)         | 2.7                    | 3.4  | 1.9   | 2.7                            | 2.8   | 2.6    | 2.44  | 2.59  | 2.36   |
| STD, (mg/L)                   | 1.36                   | 1.9  | 0.97  | 1.35                           | 1.4   | 1.32   | 1.23  | 1.3   |        |
| Potencial, (mV)               | -17                    | 25   | -61.2 | -96.4                          | -86.5 | -111.2 | -74.75  | -45.8 | -103.7 |
| Sól.Sedím. (mg/L)             | -                      |      |       | 46                             |       |        | 50  |       |        |

Esta dosis de coagulante Ca(OH)<sub>2</sub> es la recomendada (250 mg/L) ya que con ella se observó una mayor remoción de UTN, SST y DQO, mediante la aplicación de los diferentes polielectrolitos Zwitteriónicos en estudio.

**TABLA No. 25 Resultados generales obtenidos después del tratamiento Primario Avanzado con el uso de Polielectrolito Zwitteriónico No. 2. (mes de Enero 1995)**

| Polielectrolito | Dosis Polielectrolito (mg/L) | Dosis coagulante (mg/L) Ca(OH) <sub>2</sub> | $\eta_{sp}/C$ | $\eta_{sp}$ | $\eta_{sp}/C$ | pH inicial | pH final | Fecha   |
|-----------------|------------------------------|---|---------------|-------------|---------------|------------|----------|---------|
| Nalcomex        | 0.4                          | 200   | 41.1          | 59          | 22.5          | 7.88       | 8.57     | 6/1/95  |
| Zwitteriónico   | 0.4                          | 200   | 21            | 49          | 35            | 7.88       | 8.84     | 6/1/95  |
| Nalcomex        | 0.4                          | 200   | 48.4          | 73          | 34            | 8.44       | 9.36     | 10/1/95 |
| Zwitteriónico   | 0.4                          | 200   | 48            | 61          | 27            | 8.44       | 9.24     | 10/1/95 |
| Nalcomex        | 0.4                          | 250   | 93            | 78          | 40            | 8          | 9        | 18/1/95 |
| Zwitteriónico   | 0.6                          | 250   | 67            | 80          | 51            | 8          | 9        | 18/1/95 |
| Nalcomex        | 0.4                          | 250   | 85.4          | 69          | -             | 7.32       | 9        | 19/1/95 |
| Zwitteriónico   | 0.2                          | 250   | 95            | 80          | 42            | 7.32       | 9        | 19/1/95 |
| Nalcomex        | 0.4                          | 250   | 95            | 84          | -             | 8          | 9        | 20/1/95 |
| Zwitteriónico   | 0.1                          | 250   | 93.6          | 73          | 48            | 8          | 9        | 20/1/95 |
| Nalcomex        | 0.4                          | 250   | 91            | 73          | 48.6          | 9.5        | 10.9     | 23/1/95 |
| Zwitteriónico   | 0.15                         | 250   | 92            | 76          | 49.2          | 9.5        | 10.9     | 23/1/95 |

En la tabla anterior se observa que el polímero Zwitteriónico reportó mayores eficiencias a pH superior a 9, usando Ca(OH)<sub>2</sub>, como coagulante.

**PRINCIPALES RESULTADOS . ( Febrero de 1995)**

**Tabla No.26**

**En la siguiente tabla se muestra la calidad obtenida en el influente para los siguientes parámetros, con respecto a dos coagulantes ; con 51 mg/L de  $Al_2(SO_4)_3$ , 250 mg/L de  $Ca(OH)_2$  y la adición de 0.2 mg/L de polielectrolito zwitteriónico No.2 .**

| PARAMETRO                     | INFLUENTE AGUA CRUDA |      | HIDROXIDO DE CALCIO (250 mg/L) |      | HIDROXIDO DE CALCIO (250 mg/L) y 0.2 mg/L de POLIELECTROLITO ZWITTERIONICO No.2 |      | SULFATO DE ALUMINIO (51 mg/L) Y 0.2 mg/L de POLIELECTROLITO ZWITTERIONICO No.2. |      | SULFATO DE ALUMINIO (51 mg/L) |      |
|-------------------------------|----------------------|------|--------------------------------|------|---|------|---|------|-------------------------------|------|
|                               | prom.                | máx. | prom.                          | máx. | prom.   | máx. | prom.   | máx. | prom.                         | máx. |
| Sólidos Susp., Totales (mg/L) | 187                  | 260  | 43.5                           | 54   | 52  | 54   | 42  | 44   | 29                            | 40   |
| Eficiencia (%)                |                      |      | 77                             | 72   |   |      | 77.5  | 84.5 |                               |      |
| Turbiedad (UTN)               | 277                  | 425  | 22.35                          | 27.9 | 34.4  | 48.4 | 112   | 134  | 84                            | 112  |
| Eficiencia (%)                |                      |      | 92                             | 88   |   |      | 60  | 70   |                               |      |
| DQO Total (mg/L)              | 482                  | 614  | 302.5                          | 382  | 285   | 318  | 270   | 279  | 232                           | 261  |
| Eficiencia (%)                |                      |      | 38                             | 41   |   |      | 44  | 52   |                               |      |
| pH                            | 8.0                  | 9.2  | 9.2                            | 9.4  | 9.4   | 9.5  | 9.3   | 7.9  | 6.73                          | 7.78 |
|                               |                      |      |                                |      |   |      |   |      |                               | 5.75 |

**Tabla No.26 (continuación...)**

|                                |              |        |        |       |        |        |       |        |        |       |        |        |       |       |       |
|--------------------------------|--------------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|
| <b>Conductividad (mS/cm)</b>   | 2.7          | 3.4    | 1.9    | 2.7   | 2.8    | 2.6    | 2.7   | 2.75   | 2.6    | 3.11  | 3.12   | 3.11   | 2.5   | 3.04  | 2.15  |
| <b>STD (mg/L)</b>              | 1.36         | 1.9    | 0.97   | 1.35  | 1.4    | 1.32   | 1.38  | 1.31   | 1.28   | 1.55  | 1.54   | 1.35   | 1.25  | 1.52  | 1.06  |
| <b>Potencial (mV)</b>          | -17          | 25     | -61.2  | -96.4 | -86.5  | -111.2 | -99   | -87.5  | -110   | 11.9  | 29.7   | -5.8   | 38.48 | 69.2  | -2.30 |
| <b>N-NH<sub>3</sub> (mg/L)</b> | 23.4         | 31     | 2.6    | 28    | 30     | 24     | 24    | 32     | 23     | 27    | 21.3   | 27.5   | *     | *     | *     |
| <b>Sólidos Sedim. (ml/L)</b>   | No sedimenta |        |        | 46    |        |        | 47    |        |        | 15    |        |        | 15    |       |       |
| <b>Metales Pesados</b>         |              |        |        |       |        |        |       |        |        |       |        |        |       |       |       |
| <b>Pb</b>                      | 0.52         | 0.6    | 0.18   | 0.310 | 0.425  | 0.257  | 0.140 | 0.212  | 0.075  | 0.133 | 0.180  | 0.115  | 0.03  | 0.03  | 0.03  |
| <b>Eficiencia (%)</b>          |              |        |        | 40.4  |        |        | 30    |        |        | 20    |        |        | 94    |       |       |
| <b>Cd</b>                      | 0.034        | 0.039  | 0.026  | 0.004 | 0.010  | 0.001  | 0.020 | 0.052  | 0.002  | 0.030 | 0.032  | 0.028  | .001  | .05   | .01   |
| <b>Eficiencia (%)</b>          |              |        |        | 88.2  |        |        | 41    |        |        | 12    |        |        | 97    |       |       |
| <b>Cu</b>                      | 0.071        | 0.145  | 0.053  | 0.006 | 0.010  | 0.003  | 0.003 | 0.044  | 0.001  | 0.024 | 0.039  | 0.014  | .0059 | .0059 | .0059 |
| <b>Eficiencia (%)</b>          |              |        |        | 92    |        |        | 96    |        |        | 66.2  |        |        | 92    |       |       |
| <b>As</b>                      | 0.010        | 0.0116 | 0.0085 | 0.009 | 0.0112 | 0.0066 | 0.007 | 0.0099 | 0.0041 | 0.008 | 0.0103 | 0.0067 | 0.024 | 0.039 | 0.014 |
| <b>Eficiencia (%)</b>          |              |        |        | 10    |        |        | 30    |        |        | 20    |        |        | 40    |       |       |

De ésta se obtiene que el  $Al_2(SO_4)_3$  como coagulante representa globalmente una mejor opción cuándo no se añade polielectrolito . En general la dosis aplicada de polielectrolito no genera beneficios .

## PRINCIPALES RESULTADOS ( Mayo de 1995)

Tabla No.27

En la siguiente tabla se muestra la calidad obtenida en el influente, con respecto a los siguientes parámetros : adicionando como coagulante 250 mg/L de Ca(OH)<sub>2</sub> y 0.1 mg/L de polielectrolito zwitteriónico No.3 .

| PARAMETRO                     | INFLUENTE O AGUA CRUDA |       |       | HIDROXIDO DE CALCIO (250 mg/L) |       |        | HIDROXIDO DE CALCIO (250 mg/L) y 0.1 mg/L de POLIELECTROLITO ZWITTERIONICO No.3 |        |        | HIDROXIDO DE CALCIO (250 mg/L) y 0.1 mg/L de POLIELECTROLITO PROSIFLOC 25 |       |       | HIDROXIDO DE CALCIO (250 mg/L) y 0.1 mg/L de POLIELECTROLITO NALCOMEX |       |      |
|-------------------------------|------------------------|-------|-------|--------------------------------|-------|--------|---|--------|--------|---|-------|-------|---|-------|------|
|                               | prom                   | máx.  | min.  | prom.                          | máx.  | min.   | prom.   | máx.   | min.   | prom.   | máx.  | min.  | prom.   | máx.  | min. |
| Sólidos Susp., Totales (mg/L) | 158                    | 252   | 88    | 26                             | 36    | 12     | 31  | 18     | 38     | 33  | 36    | 12    | 40  | 42    | 38   |
| Eficiencia (%)                |                        |       |       |                                | 88    |        |   | 80     |        |   | 65    |       |   | 57    |      |
| Turbiedad UTN                 | 204                    | 477   | 95.1  | 36.2                           | 76    | 16     | 28  | 39     | 14     | 39  | 76    | 16    | 38  | 39    | 14   |
| Eficiencia (%)                |                        |       |       |                                | 82    |        |   | 86     |        |   | 92    |       |   | 92    |      |
| DQO Total (mg/L)              | 333                    | 526   | 162   | 302                            | 382   | 216    | 204   | 211    | 192    | 302   | 382   | 149   | 204   | 231   | 190  |
| Eficiencia (%)                |                        |       |       |                                | 11    |        |   | 38     |        |   | 42    |       |   | 55    |      |
| pH                            | 8.0                    | 9.2   | 7.0   | 9                              | 9.49  | 8.3    | 9.3   | 9.8    | 8.5    | 9   | 9.49  | 8.3   | 9.3   | 9.8   | 8.5  |
| Conductividad (mS/cm)         | 2.7                    | 3.4   | 1.9   | 2.1                            | 2.3   | 2      | 2.1   | 2.3    | 2      | 2.1   | 2.3   | 2     | 2.1   | 2.3   | 2    |
| STD, (mg/L)                   | 1.36                   | 1.9   | 0.97  | 1                              | 1.15  | 1      | 1.08  | 1.15   | 1      | 1   | 1.15  | 1     | 1.08  | 1.15  | 1    |
| Potencial, (mV)               | -17                    | 25    | -61.2 | -88.8                          | -73.8 | -98.1  | -96   | -84.2  | -113   | -88.8   | -73.8 | -98.1 | -96   | -84.2 | -113 |
| N-NH <sub>3</sub> , (mg/L)    | 23.4                   | 31    | 2.6   | 12.3                           | 15.12 | 9      | 13  | 24     | 5      | 12.3  | 15.12 | 9     | 13  | 24    | 5    |
| Sólidos Sedimentables (ml/L)  | No sedimenta           |       |       | 25                             |       |        | 15.4  |        |        | 15  |       |       | 14  |       |      |
| <b>Metales Pesados</b>        |                        |       |       |                                |       |        |   |        |        |   |       |       |   |       |      |
| Pb                            | 0.123                  | 0.132 | 0.1   | .113                           | 0.132 | 0.011  | 0.116   | 0.132  | 0.1    | *   | *     | *     | *   | *     | *    |
| Eficiencia (%)                |                        |       |       | 11                             |       |        | 6   |        |        | *   |       |       | *   |       |      |
| Cd                            | 0.0071                 | 0.008 | 0.006 | 0.006                          | 0.008 | 0.0015 | 0.005   | 0.006  | 0.0033 | *   | *     | *     | *   | *     | *    |
| Eficiencia (%)                |                        |       |       | 18                             |       |        | 34  |        |        | *   |       |       | *   |       |      |
| Cu                            | 0.083                  | 0.1   | 0.06  | 0.01                           | 0.012 | 0.0045 | 0.0055  | 0.0143 | 0.001  | *   | *     | *     | *   | *     | *    |
| Eficiencia (%)                |                        |       |       | 85                             |       |        |   |        |        | *   |       |       |   |       |      |
| As                            | 0.01                   | 0.011 | 0.008 | 0.01                           | 0.011 | 0.1    | 0.01  | 0.013  | 0.006  | *   | *     | *     | *   | *     | *    |
| Eficiencia (%)                |                        |       |       | no hay remoción                |       |        | no hay remoción   |        |        | *   |       |       | *   |       |      |

\* NOTA : No se realizó una comparación en cuanto a remoción de metales pesados

**PRINCIPALES RESULTADOS** (Mayo de 1995)

**Tabla No.28**

En la siguiente tabla se muestra la calidad obtenida en el influente, con respecto a los siguientes parámetros ; adicionando como coagulante 250 mg/L de Ca(OH)<sub>2</sub> y 0.1 mg/L de polielectrolito zwitteriónico No.4 .

| PARAMETRO                    | INFLUENTE O AGUA CRUDA |       |       | HIDROXIDO DE CALCIO (250 mg/L) |                 |        | HIDROXIDO DE CALCIO (250 mg/L) y 0.1 mg/L de POLIELECTROLITO ZWITTERIONICO No.4 |        |        | HIDROXIDO DE CALCIO (250 mg/L) y 0.1 mg/L de POLIELECTROLITO PROSIFLOC 25 |       |       | HIDROXIDO DE CALCIO (250 mg/L) y 0.1 mg/L de POLIELECTROLITO NALCOMEX |       |      |
|------------------------------|------------------------|-------|-------|--------------------------------|-----------------|--------|---|--------|--------|---|-------|-------|---|-------|------|
|                              | prom.                  | máx.  | min.  | prom.                          | máx.            | min.   | prom.   | máx.   | min.   | prom.   | máx.  | min.  | prom.   | máx.  | min. |
| Sólidos Susp., Totales(mg/L) | 158                    | 252   | 88    | 26                             | 36              | 12     | 25  | 32     | 12     | 26  | 36    | 12    | 31  | 18    | 38   |
| Eficiencia (%)               |                        |       |       |                                | 84              |        |   | 85     |        |   | 88    |       |   | 80    |      |
| Turbiedad ,UTN               | 204                    | 477   | 95.1  | 36                             | 76              | 16     | 28  | 39     | 14     | 36.2  | 76    | 16    | 28  | 39    | 14   |
| Eficiencia (%)               |                        |       |       |                                | 82              |        |   | 86     |        |   | 82    |       |   | 86    |      |
| DQO Total (mg/L)             | 333                    | 526   | 162   | 302                            | 382             | 216    | 191   | 214    | 175    | 302   | 382   | 216   | 204   | 231   | 190  |
| Eficiencia (%)               |                        |       |       |                                | 9               |        |   | 43     |        |   | 11    |       |   | 38    |      |
| pH                           | 8.0                    | 9.2   | 7.0   | 9                              | 9.49            | 8.3    | 9.3   | 9.8    | 8.5    | 9   | 9.45  | 8.3   | 9.3   | 9.8   | 8.5  |
| Conductividad (mS/cm)        | 2.7                    | 3.4   | 1.9   | 2.1                            | 2.3             | 2      | 2.1   | 2.3    | 2      | 2.1   | 2.3   | 2     | 2.1   | 2.3   | 2    |
| STD (mg/L)                   | 1.36                   | 1.9   | 0.97  | 1                              | 1.15            | 1      | 1.08  | 1.15   | 1      | 1   | 1.15  | 1     | 1.08  | 1.15  | 1    |
| Potencial (mV)               | -17                    | 25    | -61.2 | -88.8                          | -73.8           | -98.1  | -87   | -76.3  | -101   | -88.8   | -73.8 | -98.1 | -96   | -84.2 | -113 |
| N-NH <sub>3</sub> (mg/L)     | 23.4                   | 31    | 2.6   | 12.3                           | 15.12           | 9      | 20  | 28     | 13     | 12.3  | 15.12 | 9     | 13  | 24    | 5    |
| Sólidos Sedim. (ml/l)        | No sedimenta           |       |       | 25                             |                 |        | 19  |        |        | 25  |       |       | 15.4  |       |      |
| <b>Metales Pesados</b>       |                        |       |       |                                |                 |        |   |        |        |   |       |       |   |       |      |
| Pb                           | 0.123                  | 0.132 | 0.1   | .113                           | 0.132           | 0.011  | 0.121   | 0.132  | 0.11   | *   | *     | *     | *   | *     | *    |
| Eficiencia (%)               |                        |       |       |                                | 11              |        |   | 2      |        |   | *     |       |   | *     |      |
| Cd                           | 0.0071                 | 0.008 | 0.006 | 0.006                          | 0.008           | 0.0045 | 0.0062  | 0.007  | 0.0045 | *   | *     | *     | *   | *     | *    |
| Eficiencia (%)               |                        |       |       |                                | 18              |        |   | 13     |        |   | *     |       |   | *     |      |
| Cu                           | 0.083                  | 0.1   | 0.06  | 0.01                           | 0.012           | 0.0045 | 0.027   | 0.0731 | 0.01   | *   | *     | *     | *   | *     | *    |
| Eficiencia (%)               |                        |       |       |                                | 85              |        |   | 67     |        |   | *     |       |   | *     |      |
| As                           | 0.01                   | 0.011 | 0.008 | 0.01                           | 0.011           | 0.1    | 0.0086  | 0.0087 | 0.0083 | *   | *     | *     | *   | *     | *    |
| Eficiencia (%)               |                        |       |       |                                | no hay remoción |        |   | 13     |        |   | *     |       |   | *     |      |

NOTA : No se realizó una comparación en cuánto a remoción de metales pesados

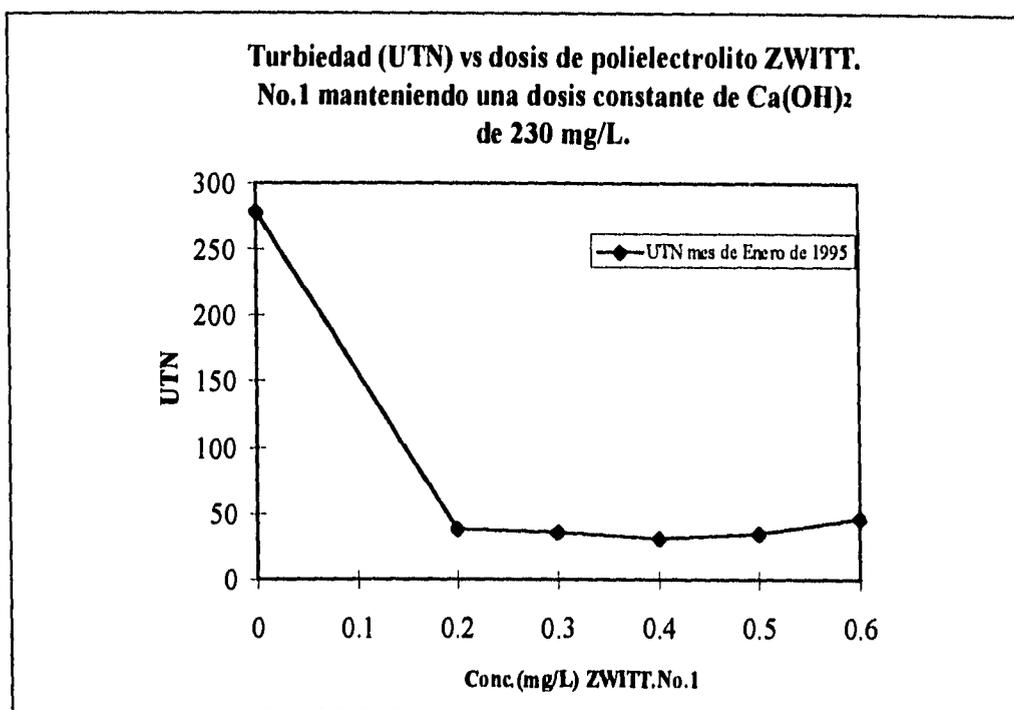
## **APARTADO No. 2**

### **GRAFICAS DE RESULTADOS**

**En los siguientes resultados, cada uno de los puntos en las gráficas es un promedio de los datos obtenidos de las 50 pruebas aproximadamente que se realizaron .**

**Se probaron cuatro polielectrolitos zwitteriónicos y con cada uno se realizaron tres pruebas que específicamente se tomaron como parámetros de control para conocer las dosis óptimas de cada uno de los cuatro floculantes; como los 2 coagulantes a probar .Estos parámetros son Sólidos Suspendidos Totales, Demanda Química de Oxígeno y Turbidez .**

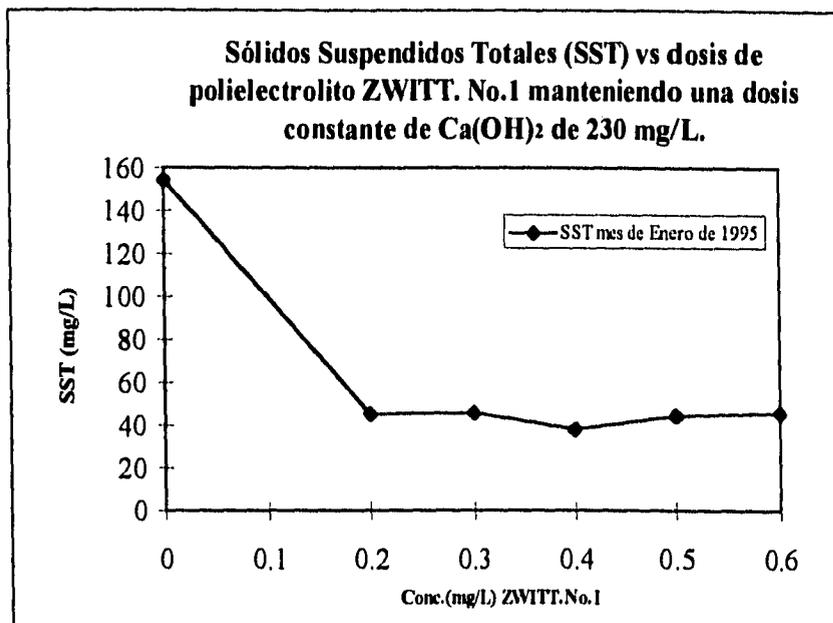
GRÁFICO No. 1



En el Gráfico No. 1 se muestra la remoción de Turbiedad con una dosis de 230 mg/L de coagulante con diferentes dosis de polímero Zwitteriónico No.1 cuya dosis recomendada es de 0.2 mg/L. En éste caso se probó una dosis de polímero de 0.1 mg/L e incluso menor, pero los resultados no eran mejores; es decir, casi no se distinguía cambio en éste parámetro; además de que la velocidad de precipitación del floculo era muy baja y su consistencia era frágil, por ésta razón es que no se consideró de importancia el significado de éstos resultados, además de que una vez que se confirmaban en la literatura los resultados de la ineficiencia con dosis menores de 0.2 mg/L, y ya no se seguía haciendo la misma prueba.

| <b>UTN mes de Enero de 1995</b> |     |
|---------------------------------|-----|
| Conc.ZWITT.No.1 (mg/L)          | UTN |
| 0                               | 278 |
| 0.2                             | 39  |
| 0.3                             | 35  |
| 0.4                             | 31  |
| 0.5                             | 35  |
| 0.6                             | 46  |

GRÁFICO No. 2

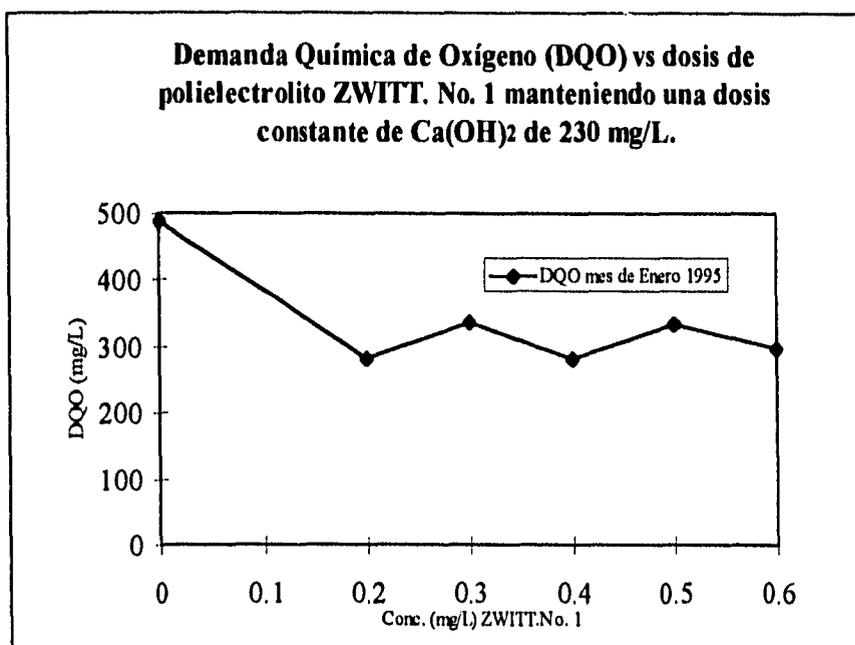


En el **Gráfico No. 2** se muestra la remoción en Sólidos Suspendedos Totales (SST) con una dosis de coagulante de 230 mg/L (inferior a la dosis recomendada de 250 mg/L) y una dosis recomendada de polímero de 0.2 mg/L para éste caso.

Dosis menores de 0.2 mg/L no son significativas ya que ni la velocidad de sedimentación y compactación del floculo aumentan con ésta dosis en adelante . Se eligió como dosis óptima la de 0.2 mg/L y no otra mayor porque tampoco se lograban cambios significativos en cuanto a remoción de SST .

| <b>SST mes de Enero de 1995</b> |            |
|---------------------------------|------------|
| Conc.ZWITT.No.1 (mg/L)          | SST (mg/L) |
| 0                               | 154        |
| 0.2                             | 45         |
| 0.3                             | 46         |
| 0.4                             | 38         |
| 0.5                             | 44         |
| 0.6                             | 46         |

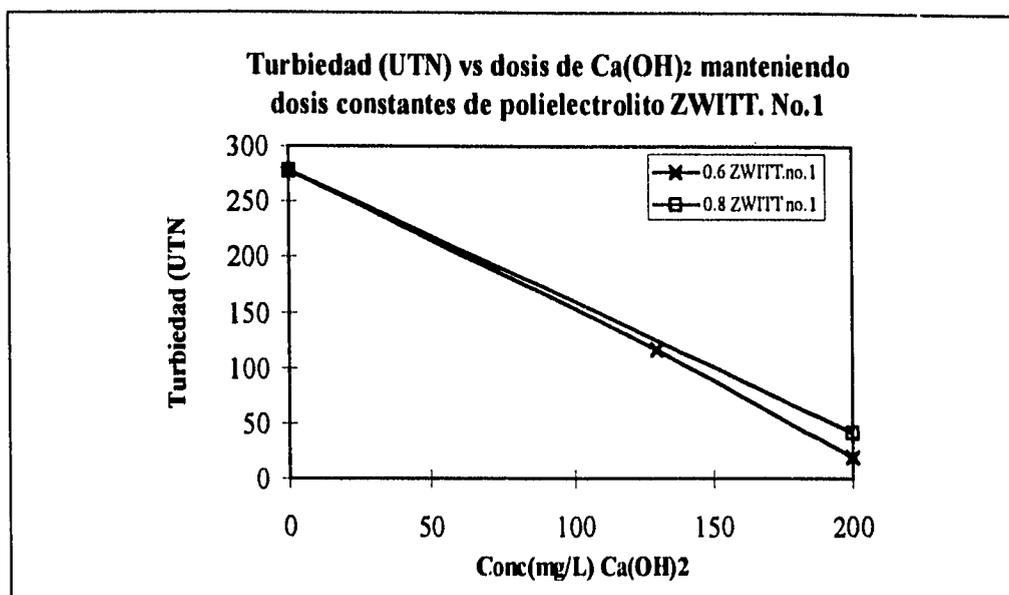
GRÁFICO No. 3



En el Gráfico No. 3 se representa la dosis mínima recomendada para la mayor remoción de DQO con el polielectrolito Zwitterionico No.1 en 0.2 mg/L. Tomando en cuenta que la dosis de coagulante no es la que se encontró como óptima para éste tipo de agua (250 mg/L), se obtuvo que con una dosis menor de 0.2 mg/L de polímero no teníamos un resultado significativo . En el agua tratada no había más de un 45% de remoción de materia orgánica .

| <b>DQO mes de Enero 1995</b> |            |
|------------------------------|------------|
| Conc.ZWITT.No.1(mg/L)        | DQO (mg/L) |
| 0                            | 489        |
| 0,2                          | 280        |
| 0,3                          | 336        |
| 0,4                          | 280        |
| 0,5                          | 334        |
| 0,6                          | 297        |

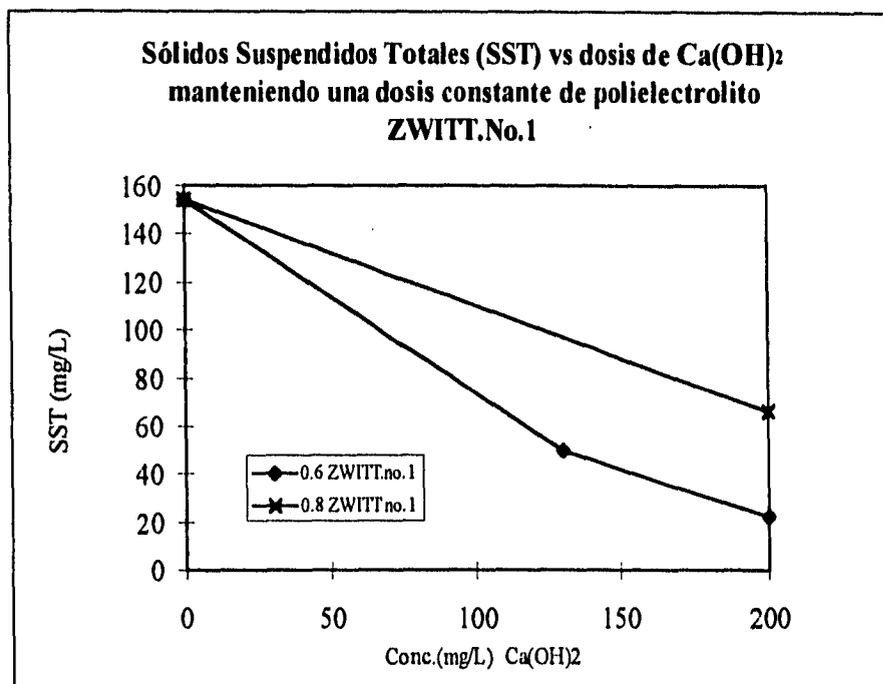
GRÁFICO No.4



En el **Gráfico No.4** se muestra la acción del coagulante Ca(OH)<sub>2</sub> con 130 y 200 mg/L y del polielectrolito Zwitteriónico No.1 en dosis del 0.6 y 0.8 mg/L. Estos son ensayos preliminares que nos sirvieron para tener una idea del funcionamiento y de las dosis que teníamos que emplear posteriormente; así como también para conocer el comportamiento de una dosis excesiva de polímero (arriba de 0.2 mg/L), lo cuál nos hace llegar a la conclusión de que a dosis mayores a la recomendada (0.2 mg/L) en lugar de mejorar o aumentar la eficiencia de remoción, sucede lo contrario, ésto se debe a que, el agregar más cantidad de polímero se vuelve una solución saturada y el aumento de Turbiedad es evidente.

| UTN en el mes de Enero 1995      |                     |                     |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|
| Conc.(m/L)de Ca(OH) <sub>2</sub> | 0.6 mg/L ZWITT.no.1 | 0.8 mg/L ZWITT no.1 |
| 0                                | 278                 | 278                 |
| 130                              | 116                 |                     |
| 200                              | 19.5                | 41.5                |

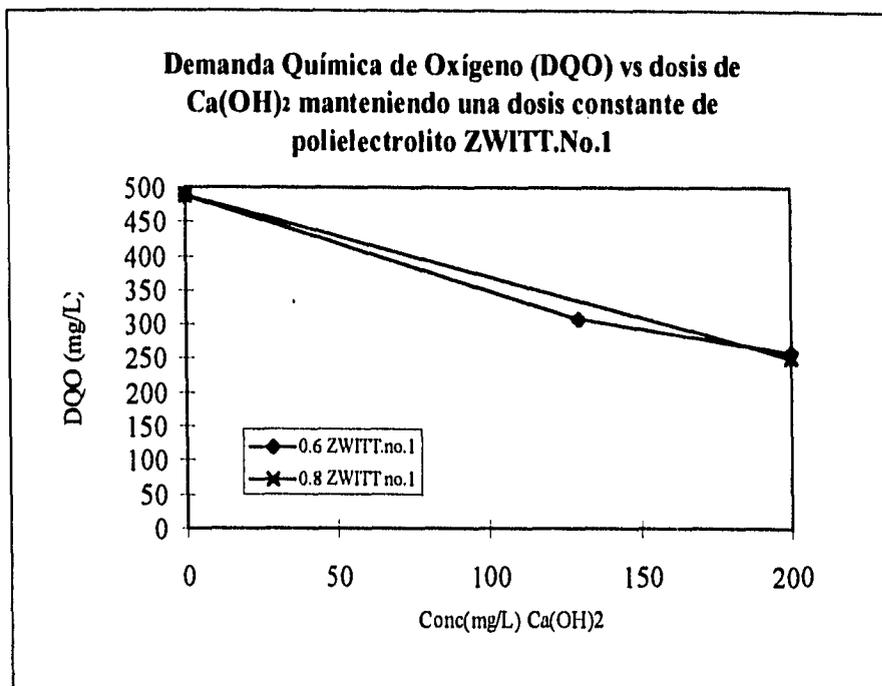
GRÁFICO No.5



En el **Gráfico No.5** se muestra el comportamiento de los Sólidos Suspendedos Totales con respecto a las diferentes dosis de polielectrolito Zwitteriónico No.1, de 0.6 y 0.8 mg/L. En éste ensayo se intentó hacer lo mismo, que en el anterior, que fué conocer el comportamiento del polímero con el agua residual en el fenómeno de coagulación-floculación empleando altas dosis del polímero con diferentes dosis de cal de 130 y 200 mg/L .

| <b>SST (mg/L) en el mes de Enero</b>     |                        |                        |
|--|------------------------|------------------------|
| Conc. $\text{Ca}(\text{OH})_2$<br>(mg/L) | 0.6 mg/L<br>ZWITT.no.1 | 0.8 mg/L<br>ZWITT no.1 |
| 0  | 154                    | 154                    |
| 130                                      | 50                     |                        |
| 200                                      | 22                     | 66                     |

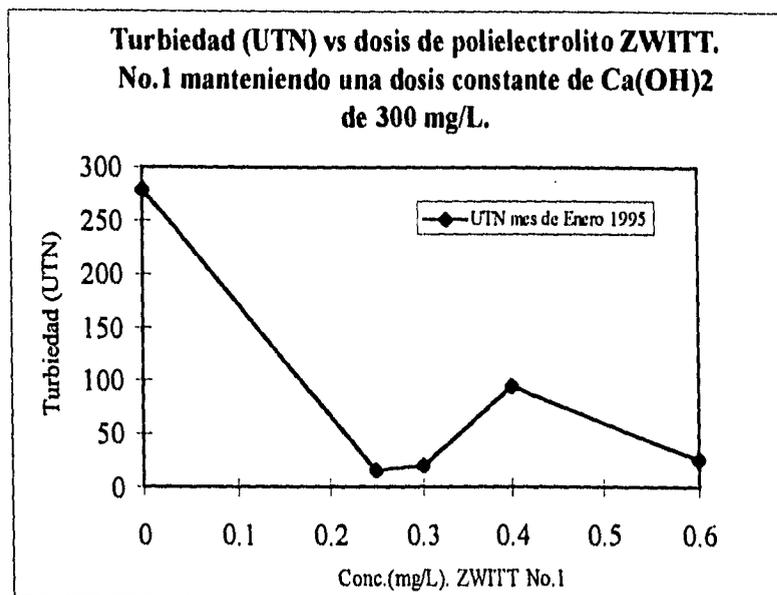
GRÁFICO No.6



En el Gráfico No.6 se muestra el comportamiento de la DQO con respecto a la variación en la dosis de polielectrolito Zwitteriónico No.1, de 0.6 y 0.8 mg/L. variando la concentración de coagulante en 130 y 200 mg/L . Como ya se había mencionado anteriormente, los parámetros más importantes en los que se desea obtener remoción son: Turbiedad (UTN), Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) la cuál no es recomendable abatir al máximo ya que la cantidad de nutrientes que contiene la materia orgánica es demasiado alta y se desea emplear parte de ésta como fertilizante para los cultivos .

| DQO (mg/L) en el mes de Enero   |                     |                     |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|
| Conc.Ca(OH) <sub>2</sub> (mg/L) | 0.6 mg/L ZWITT.No.1 | 0.8 mg/L ZWITT No.1 |
| 0                               | 489                 | 489                 |
| 130                             | 307                 |                     |
| 200                             | 258                 | 252                 |

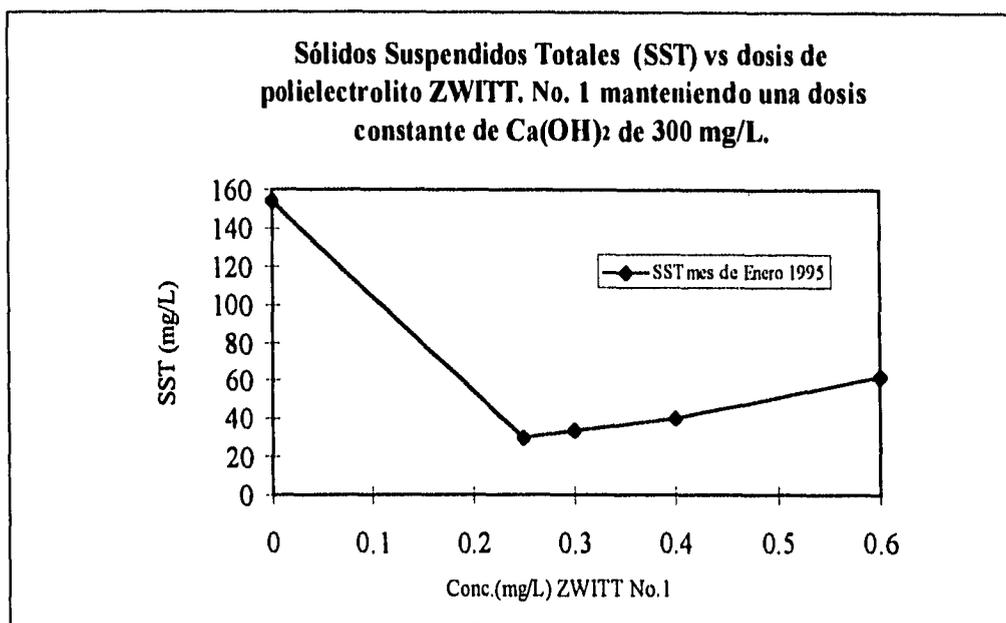
GRÁFICO No.7



En el Gráfico No.7 se muestra la efectividad del polielectrolito Zwitteriónico No.1 en la remoción de la Turbiedad con 300 mg/L de Ca(OH)<sub>2</sub> lo cuál rebasa la dosis recomendada de coagulante que es de 250 mg/L y además provoca un aumento en la dosis de polielectrolito que es como máximo de 0.2 mg/L . En éste ensayo se probó una dosis alta de coagulante y lo que se fué variando fué la dosis de polímero de 0.2 a 0.6 mg/L, en dónde se nota claramente que la dosis recomendada está entre 0.25 y 0.3 mg/L lo cuál incrementa la dosis óptima que ya se había encontrado (0.2mg/L) .

| UTN mes de Enero 1995  |     |
|------------------------|-----|
| Conc.ZWITT.No.1 (mg/L) | UTN |
| 0                      | 278 |
| 0.25                   | 16  |
| 0.3                    | 20  |
| 0.4                    | 94  |
| 0.6                    | 26  |

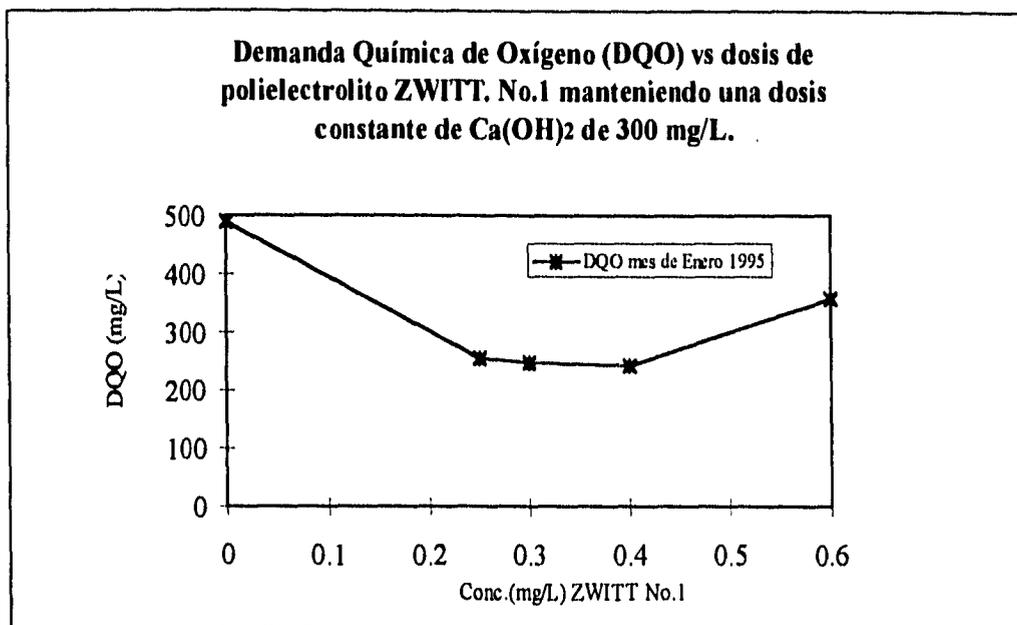
GRÁFICO No.8



En el Gráfico No.8 se muestra la remoción de Sólidos Suspendedos Totales (SST) con una dosis de coagulante de 300 mg/L probados con diferentes dosis de polímero, en donde se puede observar que la dosis recomendada es de 0.25 mg/L aproximadamente, aquí se ve incrementada por 0.5 mg/L de la dosis recomendada de polímero en comparación de cuando se prueba la dosis adecuada de cal (250 mg/L) en donde la dosis de polímero se mantiene en 0.2 mg/L, lo cuál a la larga reduce costos en cuanto a materia prima .

| <b>SST mes de Enero 1995</b> |            |
|------------------------------|------------|
| Conc..ZWITT.No.1 (mg/L)      | SST (mg/L) |
| 0                            | 154        |
| 0.25                         | 30         |
| 0.3                          | 34         |
| 0.4                          | 40         |
| 0.6                          | 62         |

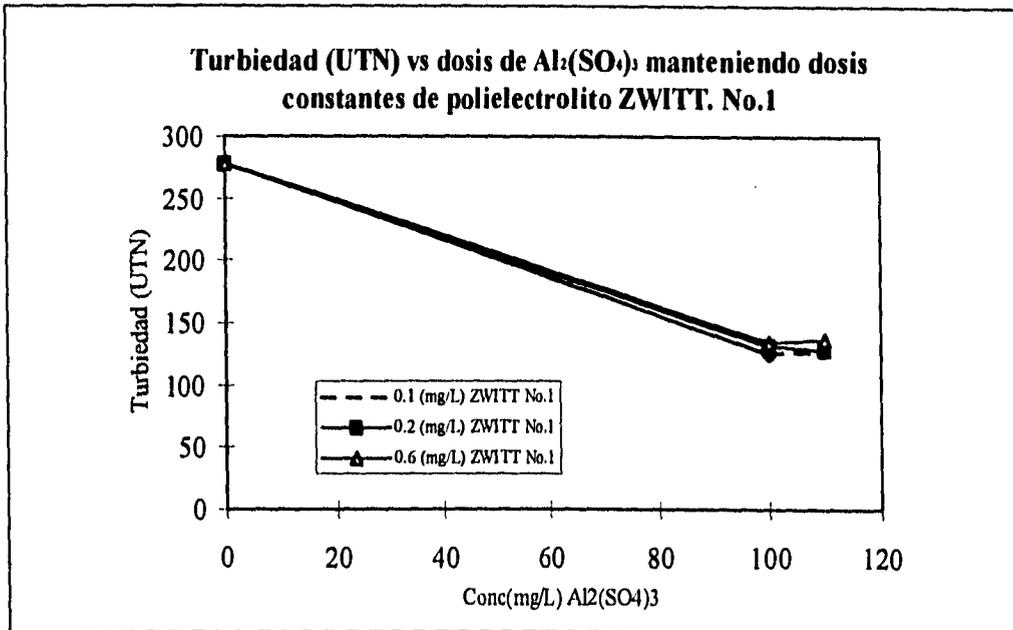
GRÁFICO No.9



En el Gráfico No.9 se muestra que la dosis mínima recomendada es de 0.25 mg/L de polielectrolito Zwitteriónico No.1 para una dosis de 300 mg/L de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , lo que indica que aunque se aumente la cantidad de coagulante, en éste caso de cal, no nos garantiza que obtendremos una mayor eficiencia con el polielectrolito además de que se aumentó la cantidad a 0.3 mg/L en comparación del uso de 250 mg/L de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

| <b>DQO mes de Enero 1995</b> |            |
|------------------------------|------------|
| Conc.ZWITT.No.1 (mg/L)       | DQO (mg/L) |
| 0                            | 489        |
| 0,25                         | 256        |
| 0,3                          | 248        |
| 0,4                          | 242        |
| 0,6                          | 358        |

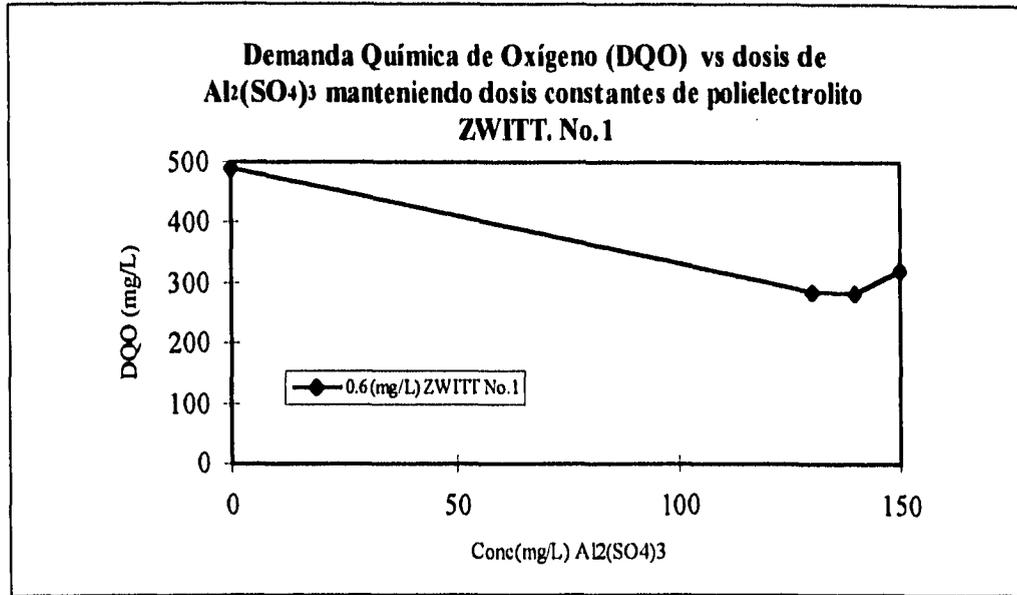
GRÁFICO No.10



En el **Gráfico No.10** se muestra como funciona el polielectrolito Zwitteriónico No.1 en diferentes dosis , manteniendo dosis constantes de sulfato de aluminio  $Al_2(SO_4)_3$  que también se probó como coagulante mostrando resultados menos eficientes que con el uso de  $Ca(OH)_2$  . Como se puede apreciar en la gráfica, no se logra una remoción significativa al aumentar la dosis a más de 0.1 mg/L de polímero .

| <b>UTN en el mes de Enero</b> |                          |                          |                          |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Conc. de $Al_2(SO_4)_3$       | 0.1 (mg/L)<br>ZWITT No.1 | 0.2 (mg/L)<br>ZWITT No.1 | 0.6 (mg/L) ZWITT<br>No.1 |
| 0                             | 278                      | 278                      | 278                      |
| 100                           | 126                      | 131                      | 134                      |
| 110                           | 128                      | 128                      | 137                      |

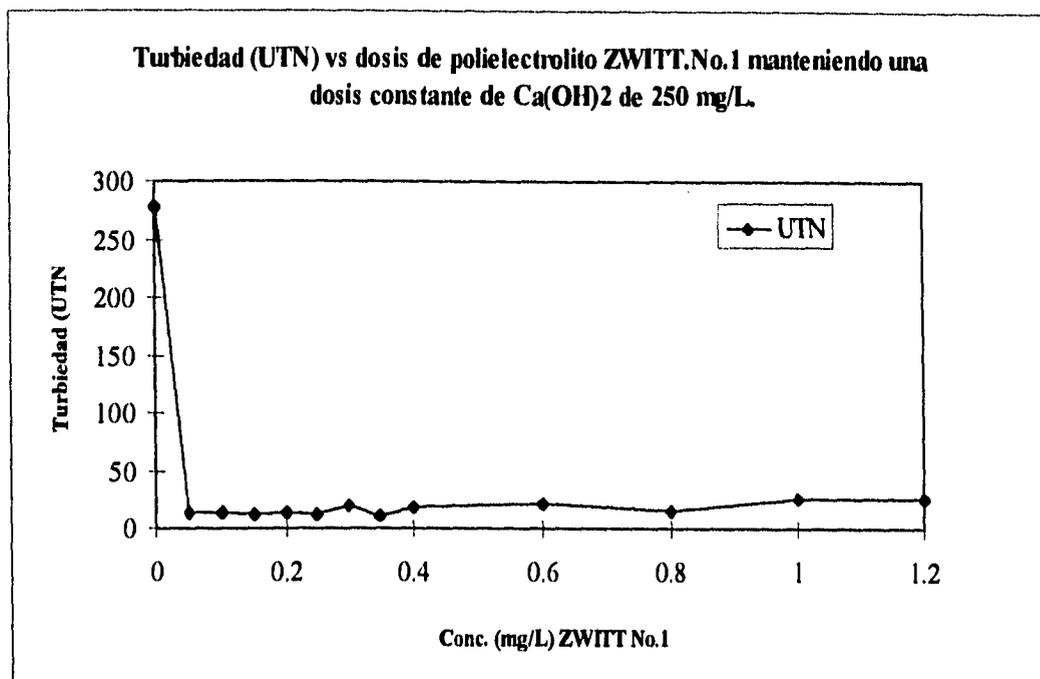
GRÁFICO No.11



En el Gráfico No.11 se muestra la remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO) utilizando diferentes dosis de  $Al_2(SO_4)_3$  y 0.6 mg/L de polielectrolito Zwitteriónico No.1. En éste ensayo lo que se pretendió fué observar el comportamiento del agua residual cuando agregamos una cantidad excesiva de polímero y se puede observar que al llevar a cabo ésta acción, la dosis de coagulante también se incrementa , lo que nos indica que las dosis recomendadas ya se sobrepasaron .

| Remoción de DQO con $Al_2(SO_4)_3$ |                       |
|------------------------------------|-----------------------|
| Conc. de $Al_2(SO_4)_3$            | 0.6 (mg/L) ZWITT No.1 |
| 0                                  | 489                   |
| 130                                | 285                   |
| 140                                | 282                   |
| 150                                | 320                   |

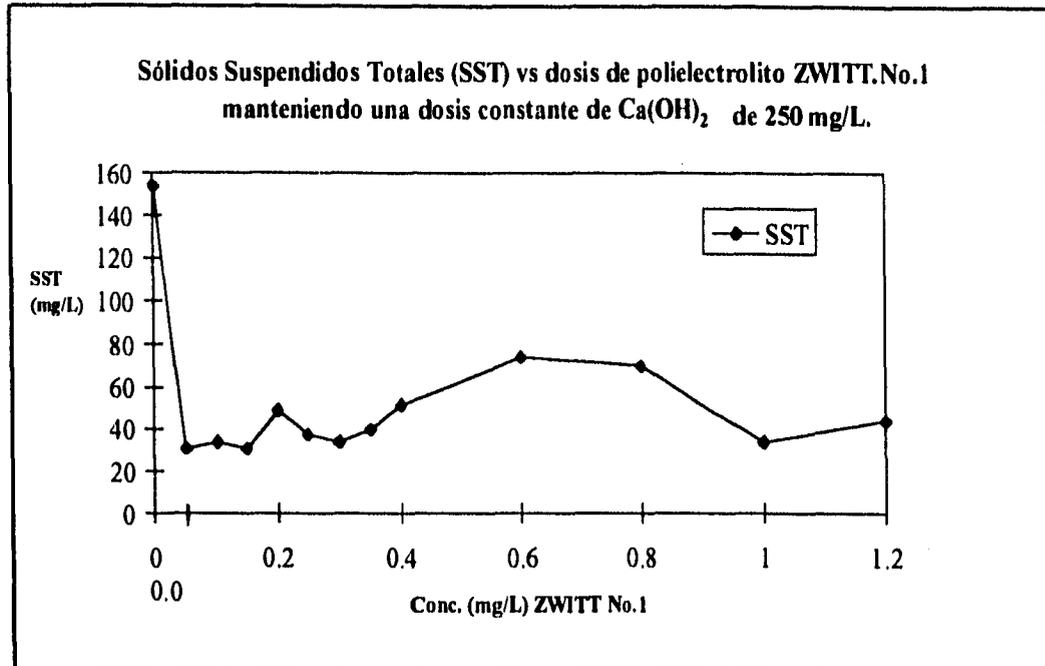
GRÁFICO No.12



En el Gráfico No.12 se puede observar la remoción de Turbiedad con el polielectrolito Zwitteriónico No.1 con 250 mg/L de Ca(OH)<sub>2</sub>, la cuál fué considerada como la dosis recomendada de coagulante ya que con ésta, se requiere de una menor cantidad de polímero, ésta dosis oscila entre 0.05y 0.25 mg/L de Zwitteriónico No 1.

| <b>UTN mes de Enero 1995</b> |     |
|------------------------------|-----|
| Conc.(mg/L) ZWITT.No.1       | UTN |
| 0                            | 278 |
| 0.05                         | 14  |
| 0.1                          | 15  |
| 0.15                         | 16  |
| 0.2                          | 14  |
| 0.25                         | 13  |
| 0.3                          | 20  |
| 0.35                         | 11  |
| 0.4                          | 18  |
| 0.6                          | 43  |
| 0.8                          | 15  |
| 1.0                          | 27  |
| 1.2                          | 26  |

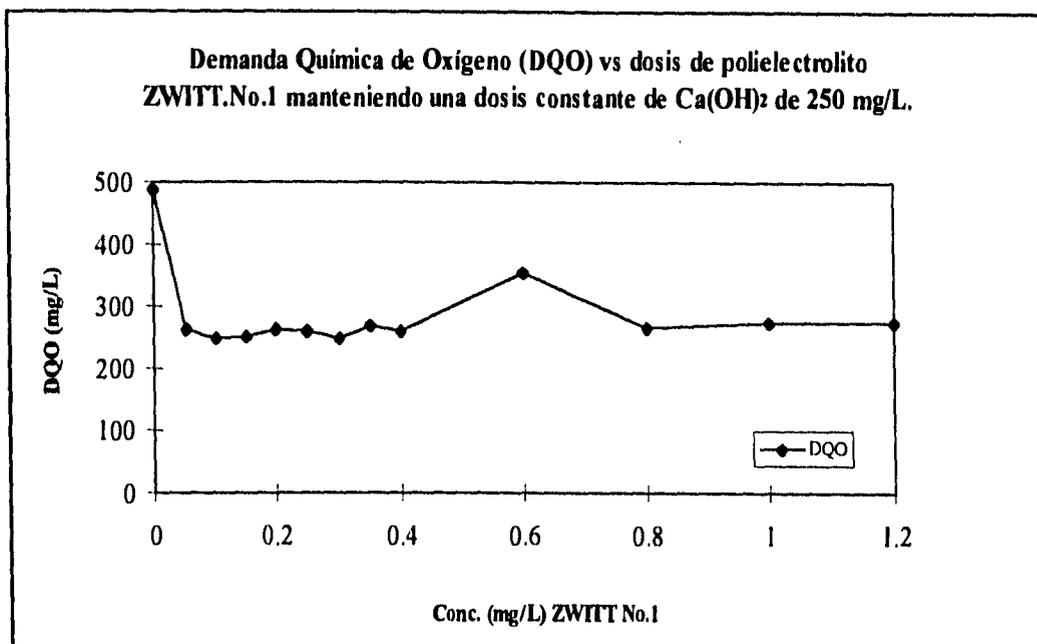
GRÁFICO No.13



Como podemos observar en el Gráfico No.13 la dosis recomendada para la mayor remoción de Sólidos Suspendedos Totales es menor de 0.2 mg/L con el polielectrolito Zwitteriónico No.1 . La mayor remoción se puede dar con una dosis de 0.05 mg/L, pero no para todos los casos, es decir, que tal vez para obtener la mayor remoción en los otros dos parámetros que son DQO y UTN ésta dosis no sea la más adecuada y no podemos estar variando la dosis para cada parámetro .

| <b>SST mes de Enero 1995</b> |     |
|------------------------------|-----|
| Conc.(mg/L) ZWITT.No.1       | SST |
| 0                            | 154 |
| 0.05                         | 31  |
| 0.1                          | 34  |
| 0.15                         | 31  |
| 0.2                          | 49  |
| 0.25                         | 37  |
| 0.3                          | 34  |
| 0.35                         | 40  |
| 0.4                          | 51  |
| 0.6                          | 74  |
| 0.8                          | 70  |
| 1.0                          | 34  |
| 1.2                          | 44  |

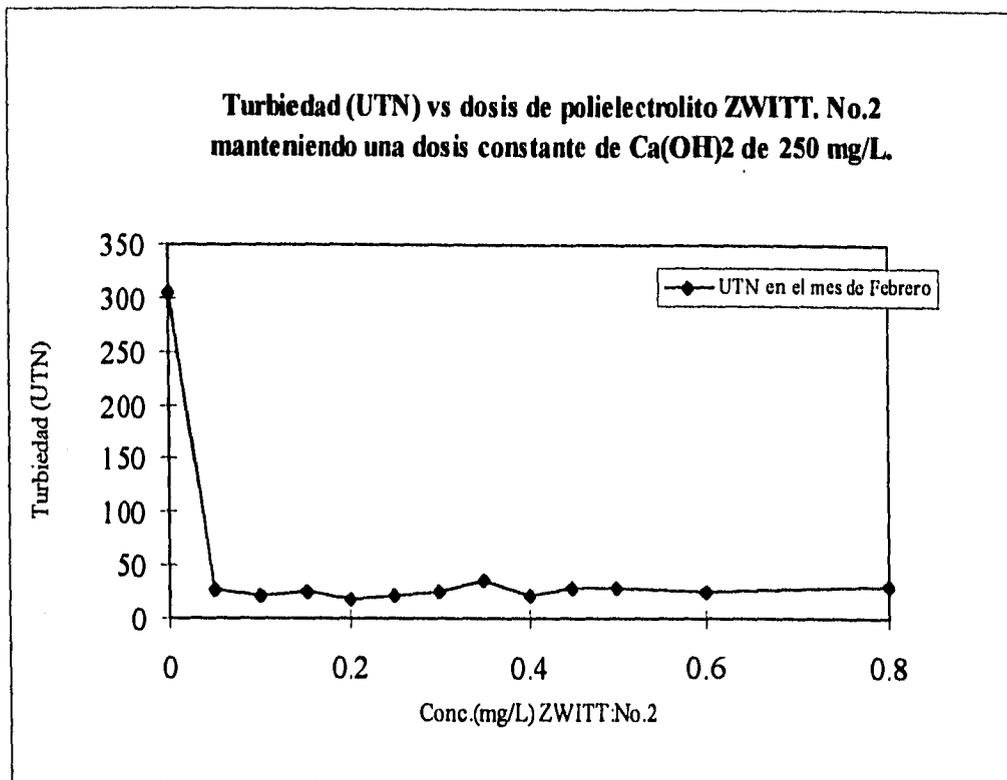
GRÁFICO No. 14



En el Gráfico No. 14 se puede apreciar que la dosis recomendada para la mayor remoción de DQO es menor de 0.2 mg/L de polielectrolito Zwitteriónico No.1, ya que con ésta dosis se tiene un rango de estabilidad en el comportamiento de la curva de DQO, tal vez puede variar un poco pero, como se puede apreciar en la gráfica, antes y después del punto de dosis óptima los valores son casi los mismos y se trata de encontrar la dosis mínima con la cuál se obtengan los mejores resultados sin que se afecten otros parámetros .

| <b>DQO mes de Enero 1995</b> |     |
|------------------------------|-----|
| Conc.(mg/L) ZWITT.No.1       | DQO |
| 0                            | 489 |
| 0.05                         | 263 |
| 0.1                          | 248 |
| 0.15                         | 251 |
| 0.2                          | 263 |
| 0.25                         | 260 |
| 0.3                          | 248 |
| 0.35                         | 270 |
| 0.4                          | 261 |
| 0.6                          | 353 |
| 0.8                          | 266 |
| 1.0                          | 274 |
| 1.2                          | 273 |

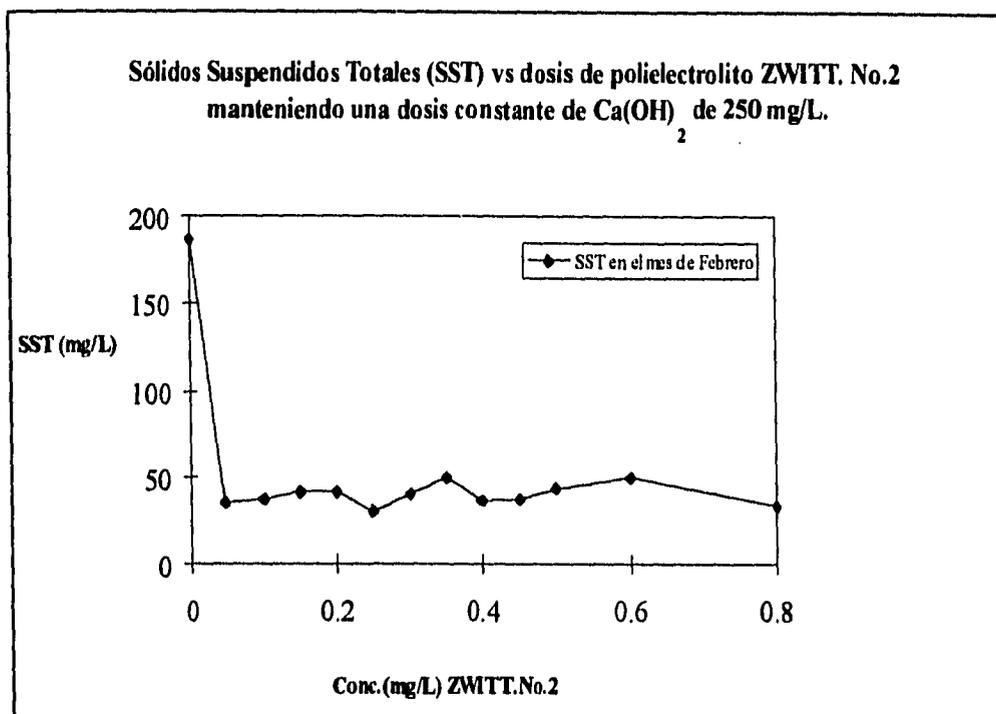
GRÁFICO No. 15



En el Gráfico No. 15 se muestra la remoción de Turbiedad con una dosis de 250 mg/L de coagulante la cuál fué tomada como dosis óptima, vs las diferentes dosis de polímero Zwitteriónico No.2 en donde la dosis óptima fué de 0.2 mg/L ya que, como puede apreciarse a ésta dosis de polímero se nota una estabilidad en cuánto a la remoción de Turbiedad .

| Dosis de Polímero | UTN en el mes de Febrero |
|-------------------|--------------------------|
| 0                 | 305.67                   |
| 0.05              | 26.8                     |
| 0.1               | 21.85                    |
| 0.15              | 25.6                     |
| 0.2               | 17.95                    |
| 0.25              | 22.2                     |
| 0.3               | 25.55                    |
| 0.35              | 35.5                     |
| 0.4               | 22.25                    |
| 0.45              | 28.7                     |
| 0.5               | 29.1                     |
| 0.6               | 25.4                     |
| 0.8               | 30.2                     |

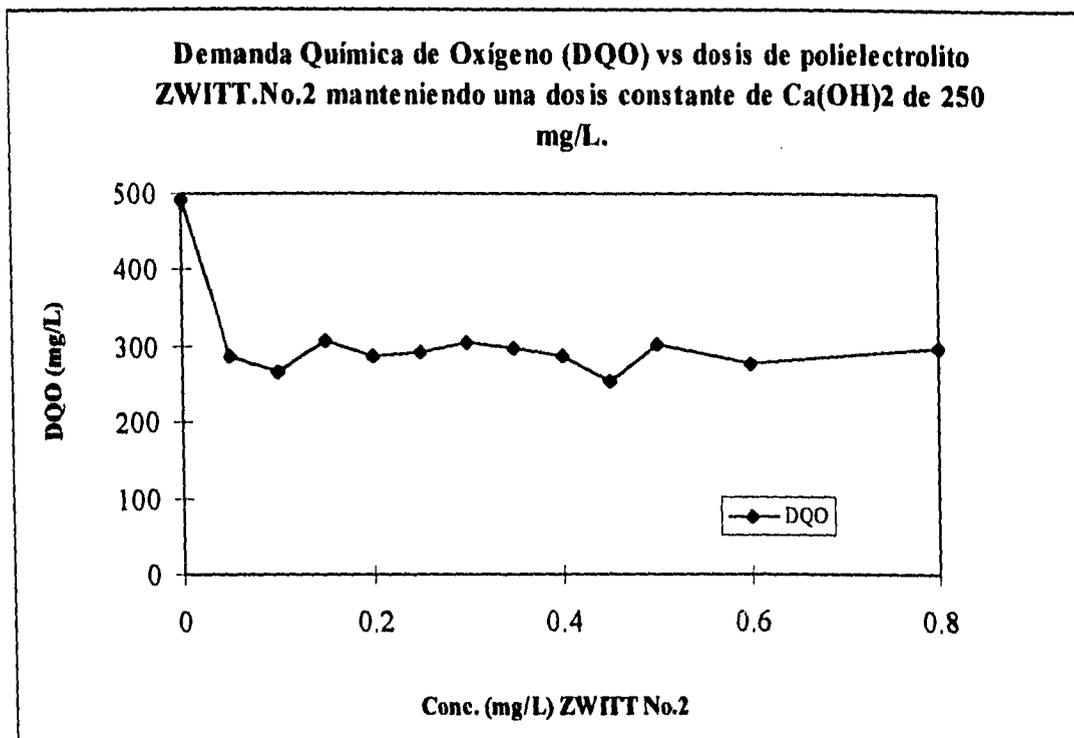
GRAFICO No.16



En el Grafico No.16 se puede observar el efecto del coagulante  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en el agua cruda o influente y la actuación del polímero Zwitteriónico No.2 en la remoción de Sólidos Suspendedos Totales . Se tomaron como dosis recomendadas la de 0.2 mg/L de polímero y 250 mg/L de coagulante  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  .

| Dosis de ZWITT.No.2 | SST en el mes de Febrero |
|---------------------|--------------------------|
| 0                   | 186.33                   |
| 0.05                | 36                       |
| 0.1                 | 38                       |
| 0.15                | 42                       |
| 0.2                 | 42                       |
| 0.25                | 30                       |
| 0.3                 | 41                       |
| 0.35                | 50                       |
| 0.4                 | 37                       |
| 0.45                | 38                       |
| 0.5                 | 44                       |
| 0.6                 | 50                       |
| 0.8                 | 34                       |

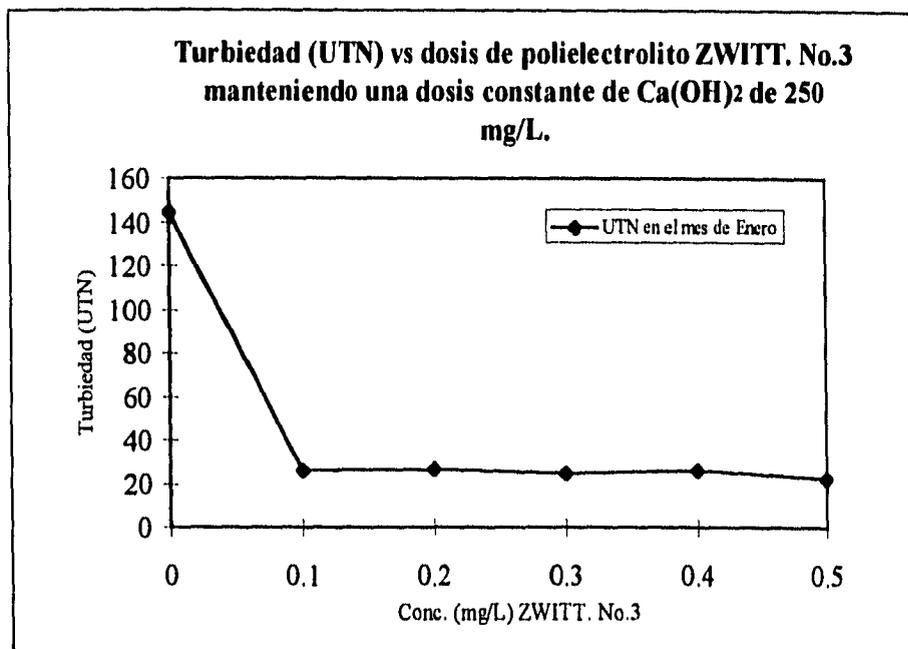
GRÁFICO No.17



En el Gráfico No.17 se representa la dosis mínima recomendada para la mayor remoción de DQO con el polielectrolito Zwitteriónico No.2 con una dosis de 0.2 mg/L y con 250 mg/L de Ca(OH)<sub>2</sub>, que se tomó como dosis óptima de coagulante . Estas son las condiciones que se encontraron como óptimas, según se muestra en la tabla siguiente .

| Dosis de Polímero | DQO para el mes de Febrero |
|-------------------|----------------------------|
| 0                 | 491.33                     |
| 0.05              | 288                        |
| 0.1               | 266                        |
| 0.15              | 308                        |
| 0.2               | 286                        |
| 0.25              | 292                        |
| 0.3               | 305.5                      |
| 0.35              | 305                        |
| 0.4               | 286                        |
| 0.45              | 253                        |
| 0.5               | 301                        |
| 0.6               | 277.5                      |
| 0.8               | 297                        |

GRÁFICO No.18

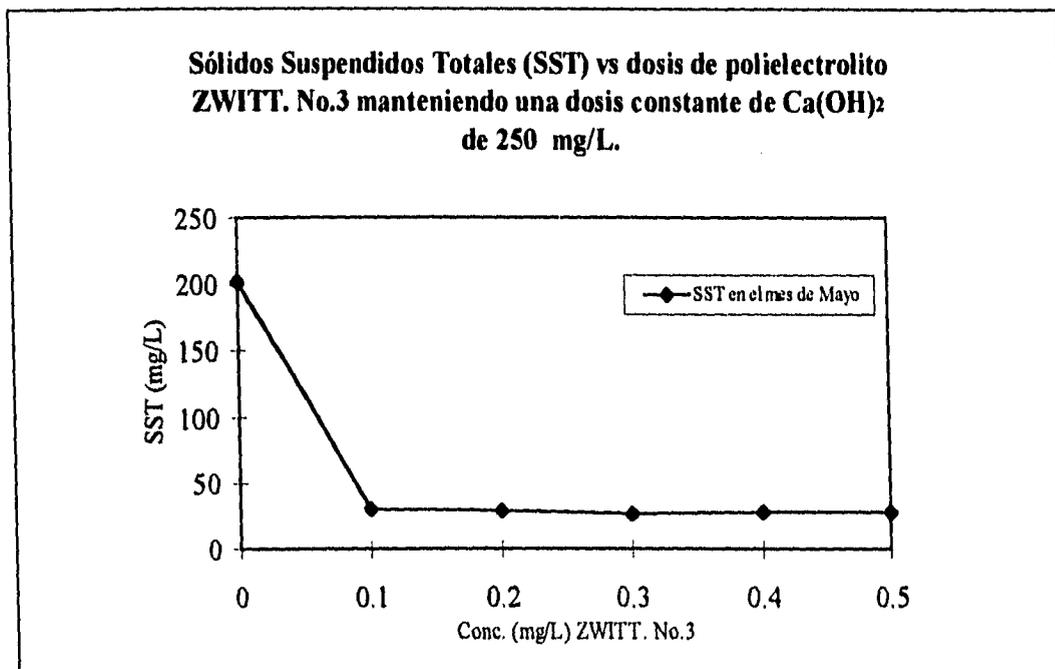


En el Gráfico No.18 se muestra que la dosis recomendada para la mayor remoción de Turbiedad es de 0.1 mg/L para el polielectrolito Zwitteriónico No.3. ya que, como se puede observar el comportamiento es el mismo al agregar mayor cantidad de polielectrolito .

Con éste polielectrolito se reduce notablemente la dosis óptima en un 50% en comparación con los dos anteriores, lo que repercute en los costos, si éstos estudios se llevarán de escala laboratorio a escala industrial en una planta de tratamiento .

| <b>UTN en el mes de Enero</b> |       |
|-------------------------------|-------|
| Conc.(mg/L) ZWITT. No.3       | UTN   |
| 0                             | 144   |
| 0,1                           | 25,86 |
| 0,2                           | 26,36 |
| 0,3                           | 24,66 |
| 0,4                           | 25,88 |
| 0,5                           | 22,45 |

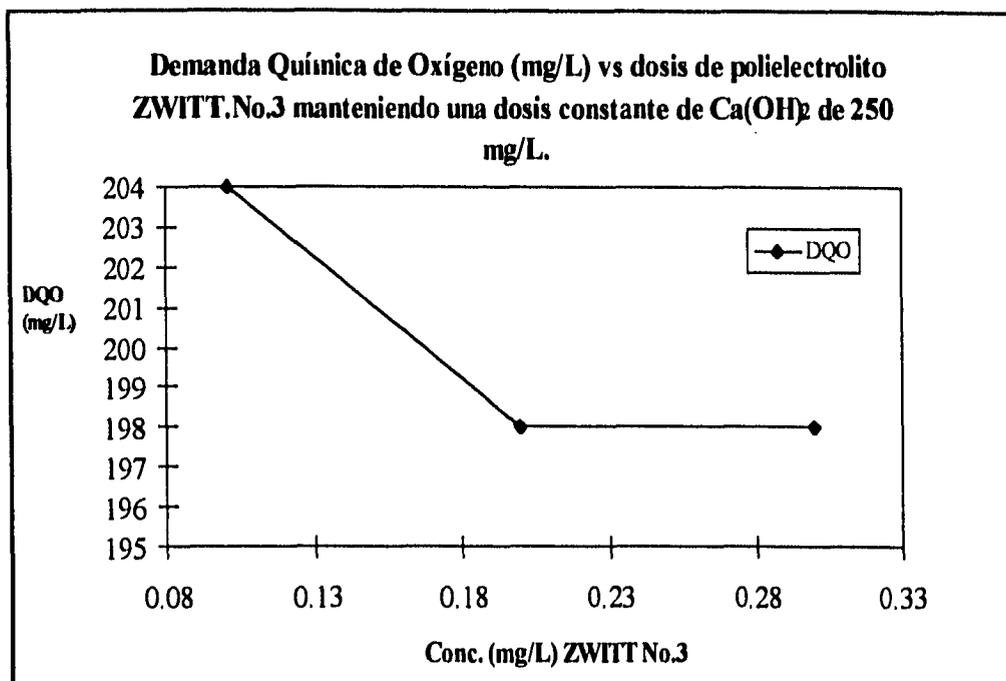
GRÁFICO No.19



En el Gráfico No.19 se puede observar el efecto del coagulante  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en el agua cruda o influente y como actúa el polímero Zwitteriónico No.3 en la remoción de SST. Se tomó como dosis recomendada la de 0.1 mg/L de ZWITT.No.3 ya que según la gráfica en éste punto es en donde existe una estabilidad en el comportamiento del polímero.

| SST en el mes de Mayo  |            |
|------------------------|------------|
| Conc.(mg/L) ZWITT.No.3 | SST (mg/L) |
| 0                      | 202        |
| 0,1                    | 30         |
| 0,2                    | 29         |
| 0,3                    | 26         |
| 0,4                    | 28         |
| 0,5                    | 28         |

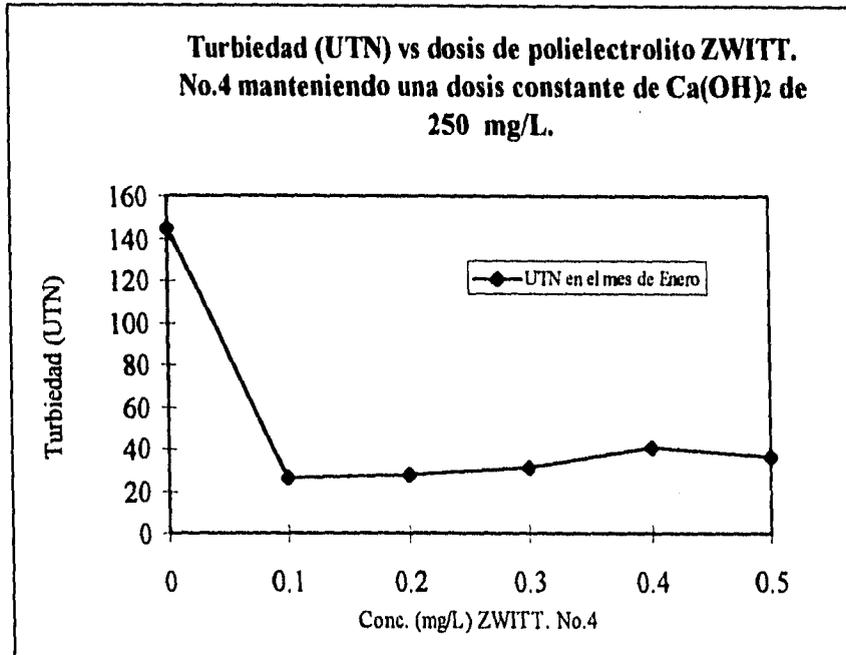
GRÁFICA No.20



Como se puede observar en la Gráfica No.20 la dosis recomendada de polielectrolito Zwitteriónico No.3 se encuentra aproximadamente a 0.1 mg/L, que se eligió como dosis óptima porque aunque se aprecia una ligera disminución de la DQO si aumentamos la dosis a 0.2 mg/L, pero 5 mg/L de DQO no es realmente significativo, por ésta razón conviene dejar la dosis óptima en 0.1 mg/L .

| <b>DQO en el mes de Julio</b> |            |
|-------------------------------|------------|
| Conc.(mg/L) ZWITT.No..3       | DQO (mg/L) |
| 0                             | 333        |
| 0,1                           | 204        |
| 0,2                           | 198        |
| 0,3                           | 198        |

GRÁFICO No.21

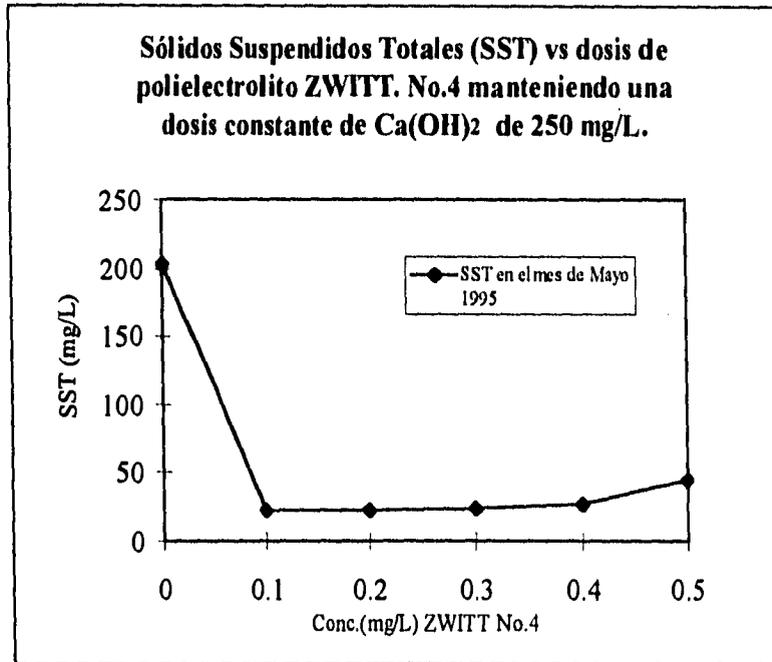


En el Gráfico No.21 se puede observar que la dosis mínima recomendada para obtener la mayor remoción en Turbiedad es de 0.1mg/L con el polielectrolito Zwitteriónico No.4 .

Inclusive, pudo haberse probado una dosis menor pero la razón por la cuál no se hizo fué porque la precisión con la que se mida una dosis menor de 0.1 mg/L puede ser muy baja para cuándo se realice cada una de las pruebas y ésto nos conduciría a resultados erróneos, es por eso que se utilizó como dosis mínima la 0.1 mg/L .

| <b>UTN mes de Enero de 1995</b> |     |
|---------------------------------|-----|
| Conc.ZWITT.No.4 (mg/L)          | UTN |
| 0                               | 278 |
| 0,2                             | 39  |
| 0,3                             | 35  |
| 0,4                             | 31  |
| 0,5                             | 35  |
| 0,6                             | 46  |

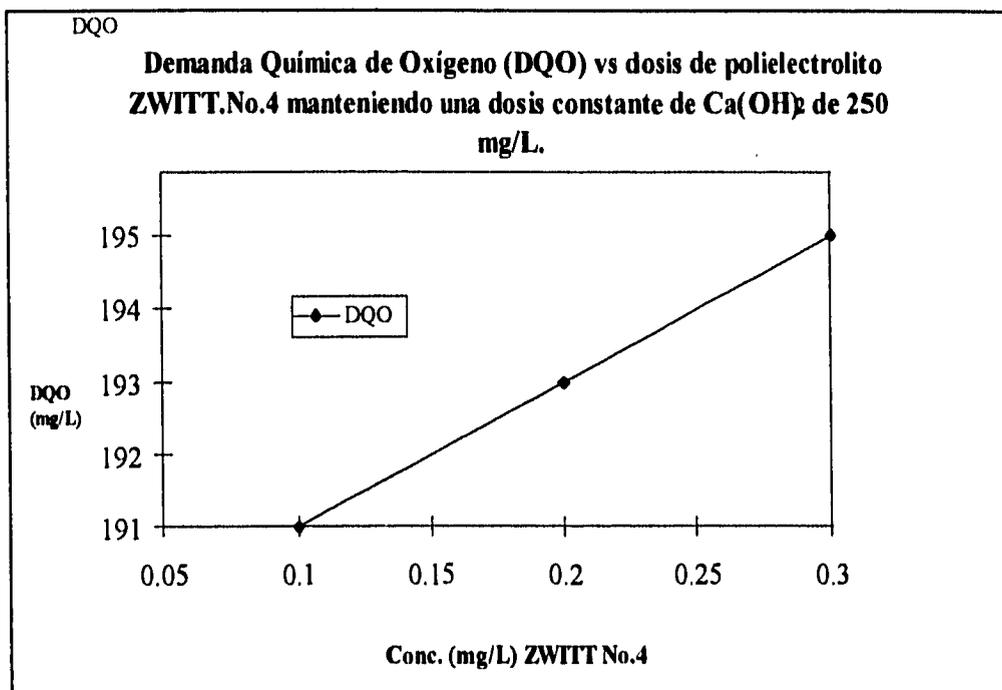
GRÁFICA No.22



En la **Gráfica No.22** se muestra que la dosis recomendada de polielectrolito Zwitteriónico No.4 se encuentra en 0.1 mg/L ya que lo que se busca es una dosis mínima con la que se tenga la mayor remoción de SST, y en donde se tenga un comportamiento estable. Aunque se le agreguen dosis mayores, con esto lo que se pretende es obtener mejores resultados con los costos más bajos .

| <b>SST en el mes de Mayo 1995</b> |            |
|-----------------------------------|------------|
| Conc.(mg/L) ZWITT.No.4            | SST (mg/L) |
| 0                                 | 203        |
| 0,1                               | 23         |
| 0,2                               | 23         |
| 0,3                               | 24         |
| 0,4                               | 27         |
| 0,5                               | 45         |
| 0,5                               | 45         |

GRÁFICO No.23



Como se puede observar en el **Gráfico No.23** la dosis recomendable para la mayor remoción de DQO con el polielectrolito Zwitteriónico No.4 es de 0.1 mg/L . En éste grupo de ensayos se puede observar muy claramente como se incrementa el valor de éste parámetro al aumentar la dosis del polielectrolito, además de que se hicieron muy pocas pruebas de DQO debido al alto costo de los reactivos para determinarla si ya se tenían los datos suficientes para conocer el comportamiento .

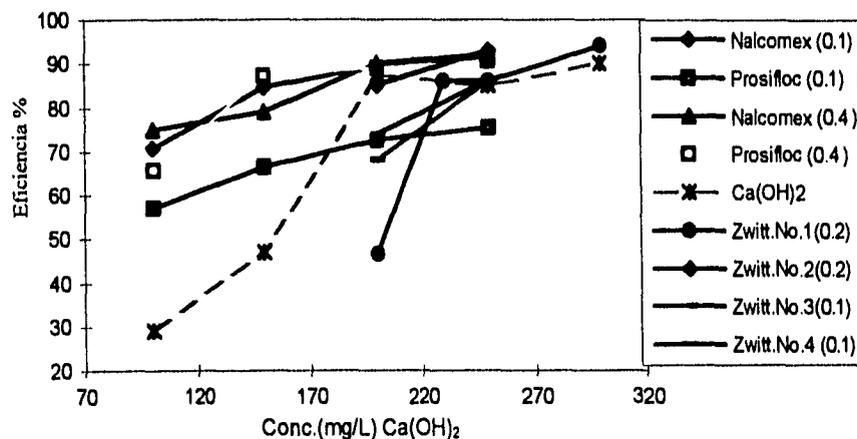
| <b>DQO en el mes de Mayo 1995</b> |            |
|-----------------------------------|------------|
| Conc.(mg/L) ZWITT.No.4            | DQO (mg/L) |
| 0                                 | 333        |
| 0,1                               | 191        |
| 0,2                               | 193        |
| 0,3                               | 195        |

A continuación se presentan los resultados en forma condensada para mostrar de manera general la eficiencia de cada uno de los polielectrolitos y su función con los dos coagulantes utilizados .

**GRÁFICO No.24**

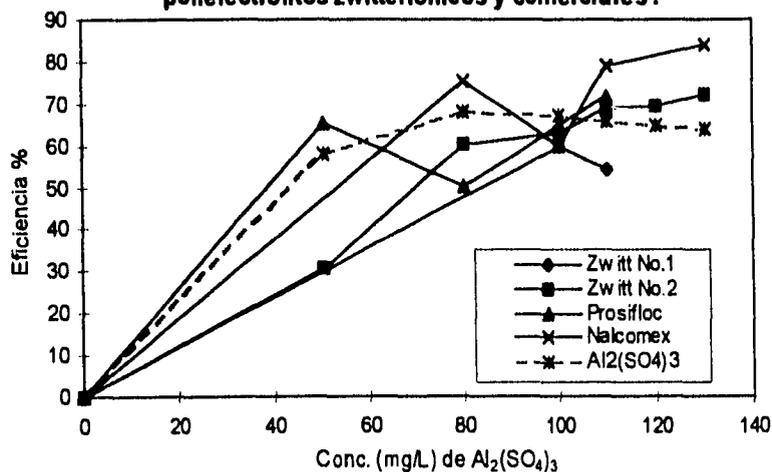
En la siguiente gráfica se muestra de manera general la eficiencia de los polielectrolitos Nalcomex, Prosifloc, Zwitt. No.1,2,3 y 4 y su función con el Hidróxido de Calcio en diferentes dosis que van de 50 a 300 mg/L.

**Eficiencia en remoción de Turbiedad vs Concentración de Coagulante  $\text{Ca(OH)}_2$**



**GRÁFICO No.25**

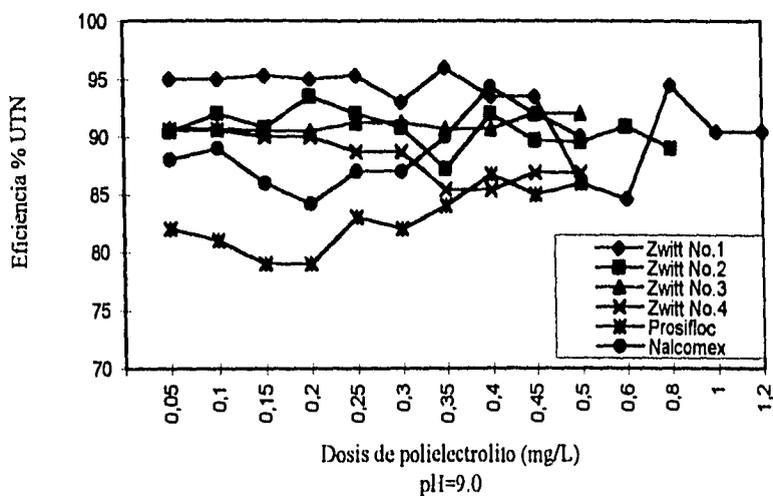
**Eficiencia en remoción de Turbiedad vs Concentración de Coagulante  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  para una dosis constante de polielectrolitos zwitteriónicos y comerciales .**



**GRÁFICO No.26**

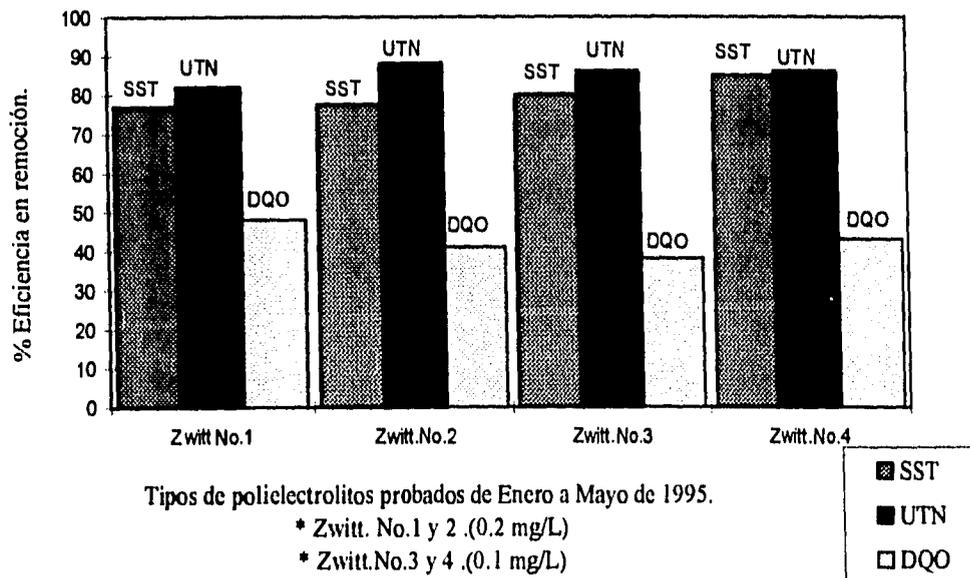
En ésta gráfica lo único que cambia es que en lugar de variar la dosis de  $\text{Ca(OH)}_2$  ; variamos la dosis de polímero de 0.05 a 1.2 mg/L y dejamos constante la dosis (óptima) de  $\text{Ca(OH)}_2$  en 250 mg/L .

Eficiencia en remoción de Turbiedad vs Concentración de los diferentes polielectrolitos zwitteriónicos y dos aniónicos comerciales manteniendo una dosis constante de  $\text{Ca(OH)}_2$  de 250 mg/L :



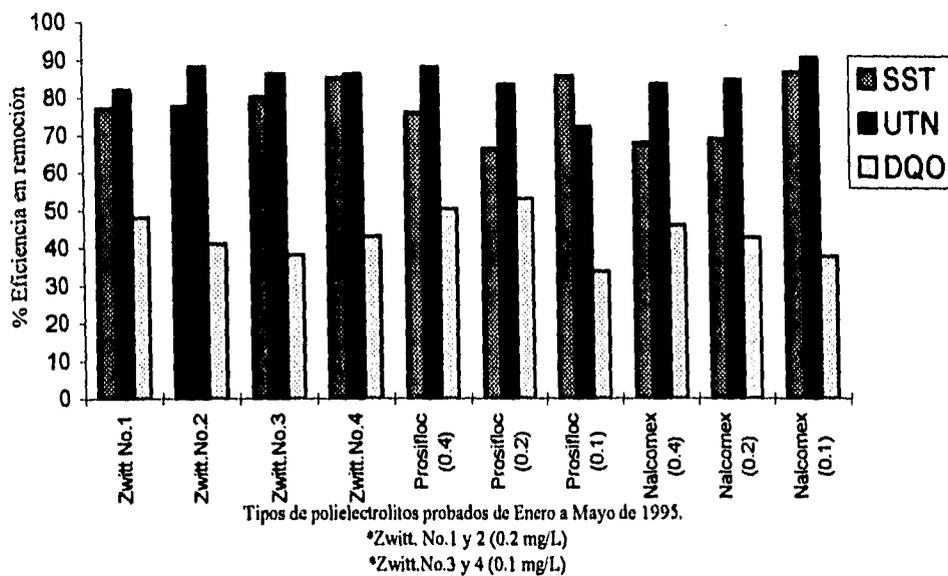
**GRÁFICO No.27**

Comparación de la actividad de los 4 tipos de polielectrolitos Zwitteriónicos con respecto a SST, DQO y UTN, con 250 mg/L de  $\text{Ca(OH)}_2$ , pH = 8.5-9, considerando las dosis recomendadas para cada uno de ellos.



**GRÁFICO No.28**

Comparación de la actividad de los 4 tipos de polielectrolitos Zwitteriónicos y los 2 polielectrolitos comerciales Prosilfloc y Nalcomex con respecto a SST, DQO y UTN, con 250 mg/L de Ca(OH)<sub>2</sub>, pH = 8.5-9.0, considerando las dosis recomendadas para cada uno



## BIBLIOGRAFIA

1. *Agua y Sociedad* . Folleto de la SEP ,IMTA y CNA . 1993 .
2. A.P.Black, F.B.Birkner, and J.J Morgan . *Polymer Flocculation Kinetics of Dilute Colloidal Suspensions* . J. Am. Water Works Assoc.21, 626 (1968) .
3. Black A.P., and M.R. Vilaret . *Effect of Particle size on Turbidity Removal* . J. Am. Water Works Assoc 61 (4), 209 (1969)
4. Brejchova R & Wiesner M.R. *Effect of Delaying the addition of polymeric coagulant-aid on Settled Water Turbidity* . Water Science & Technology . 26, No.9-11, 2281-2284 (1982) .
5. Bratby John .R., *Optimizing coagulants and flocculant aids for settling*. J. Am. Water Works Assoc.,73,312,( 1981-a) .
6. Bratby John R . *Interpreting laboratory Results for design of rapid mixing and flocculation systems,..* Journal of AWWA, 73, 318 (1981-b) .
7. Bratby J., *Coagulation and Flocculation*, Uplands Press,Inc., Crydon, UK, 1980, Chapt. 1, pp.5 and 6. Contains the most complete account of the title subject.
8. Bockris, J.O'M and A.K.N.Reddy, *Modern Electrochemical*,Vol.II,Plenum Press,New York,1970,XChapt.7,pp.623-841.
9. Bard A.J. and L.R. Faulkner, *Electrochemical Methods*,Fundamentals and Applications,Jhon Wiley and Sons, Inc., New York,1980,pp. 8-10,488-514.
10. Cardoso Martínez Judith Ma. de Lourdes . *Sintesis, caracterización y propiedades de polímeros y copolímeros zwitteriónicos* .1990 . Tesis Doctoral . UNAM .
11. Chamberlain Ralph J. *Polyelectrolites Makeup and Handling* .in W.L.K. Schwoyer, ed.,*Polyelectrolites for Water and Wastewater Treatment*, CRC press, Inc., Boca Raton,Fla.,1981, pp.243-266 .
12. Comisión Nacional del Agua. (1994) "*Saneamiento del Valle de México*". Informe de Avance al mes de Febrero. 36 pp.
13. Eckenfelder W. Jr. "*Industrial Water Pollution Control*". 2a. edición. Ed. Mc-Graw-Hill International Edition. Civil Engineering, Series. pp 84- 95. (1989) .
14. Fattal B. Puyesky, et.al. *Removal of indicator microorganisms in waste water reservoir in relation to physicochemical variables*. Water Science and Technology . Vol. 27. No.7-8, pp 321-329, 1993 .
15. Fettig J., Ratnawera H. y Odegaard H. "*Synthetic polymers in wastewater treatment*". pp Water Supply, Vol 8, Jonkoping, 19-26. (1990) .
16. Garris John .*Polyamino Acids derived from the matrix protein of oyster shell as dispersants & and flocculants in water treatment* .University of South of Alabama . Mobile, 36688 .
17. Gregory J. in C.A. Finch, ed.,*Chemistry and Technology of Water Soluble Polymers*,plenum Press, New York, 1983, pp. 307-320 .
18. Gregory J., J. Colloid Interface Sci. 42 (2),448 (1973).
19. Griot O.and J.A. Kitchener, Discuss.Faraday Soc.61, 1026 (1965).
20. Ham Ocampo Ma. Paulina & Crespo Sosa Rafael . "*Estudio comparativo de la aplicacion de los polimeros zwitterionicos en el tratamiento de agua*".1989 188p. Tesis UNAM . Facultad de Química .
21. James C.R. and C.R.O'Melia, *Considering sludge production in the selection of coagulants*. J. Am. Water Works Assoc. 74, 148 (1982)..

22. Kemmer F.N., ed., *Nalco Water Treatment Handbook*, Chapt.8 . McGraw-Hill, Inc., New York, 1988.
23. Kitchener J.A., Br.Polym.J.4,217 (1972)
24. Kragh A.M. and Langston, J. Colloid Sci. 17, 101 (1962).
25. La Mer V.K. and R.H. Smellie, Jr., J. Colloid Sci. 11, 704 y 720 (1956).
26. La Mer V.K. and R.H. Smellie J. Colloid Interfase Sci. 13, 589 (1958)
27. Letterman Raymond D . *Contaminants in Polyelectrolytes Used in Water Treatment* . Journal of AWWA: p.87, (1990) .
28. Levine N.M. **Natural Polymer Processes** in W.L.K. Schwoyer, ed., *Polyelectrolites for Water and Wastewater Treatment*, CRC press, Inc., Boca Raton, Fla., 1981., pp 47-59 .
29. Luttinger Lionel B . *The Use of Polyelectrolites in Filtration Processes* in W.L.K. Schwoyer, ed., *Polyelectrolites for Water and Wastewater Treatment*, CRC press, Inc., Boca Raton, Fla., 1981, pp.211-242.
30. Lyklema J. in K.J. Ives, ed., *The Scientific Basis of Flocculation*, Sijthoff & Noordhoff International Publishers, Alpen aan den Rijn, The Netherlands, 1978, pp.3-36.
31. Mace R. Guy . *Specifier's Guide to Polymer . Feed Systems* . Pollution Engineering . May 1990 .
32. Manero B.O., Cardoso Judith, & Teresa Orta de Velásquez . *Synthesis and properties of new Polymeric coagulants used in Water Treatment Operations* . Journal of Polymer Science, Polym. Phys. Ed. 29, 63 (1991)
33. Mallevalle J., A. Bruchet, and F. Fiessinger . *How Safe are organic Polymers in Water Treatment?* J. Am. Water Works Assoc. 76, 87 (1984).
34. Matijevic E. and L.J. Stryker, J. Colloid Sci. 22 , 68 (1966).
35. Matijevic E., K.G. Mathai, R.H. Ottewill, and M. Kerker, J. Phys. Chem. 65, 826 (1961).
36. *Métodos estandarizados para análisis de agua y agua residual* . Ed. Díaz de Santos . España . 1988
37. O'Melia C.R. in W.J. Weber, Jr, ed., *Physicochemical Process for Water Quality Control*, Wiley-Interscience, New York, 1972, Chapt.2, pp.61-109.
38. Ooten R.J., Shao Y.J., Soroushian F. y Crosse J. (1993). "*Southern California secondary equivalency treatment research and operational projects*". 66th Annual Conference & Exposition, Anaheim, California, USA Octubre 3-7, Water Environment Federation. pp 95-106.
39. Ortiz Monasterio Fernando . *Contaminación en la cd. de México* . ed. Milenio .
40. Penniman John G. *Electrokinetics* , in W.L.K. Schwoyer, ed., *Polyelectrolites for Water and Wastewater Treatment*, CRC press, Inc., Boca Raton, Fla., 1981 pp.61 .
41. Ramos Carpio & De María . *Ingeniería de los Materiales Plásticos* . Ed. Díaz de Santos S.A., Madrid, España. 1988 .
42. Sanchez Cruz Miguel Angel . UNAM FQ. Tesis de Lic . "*Determinacion y seleccion de los parametros fisicoquimicos optimos para el proceso de coagulacion -floculacion de la planta potabilizadora piloto Necaxa*".
43. Sandell L.S. and P. Luner, J. Appl. Polym. Sci. 18, 2075 (1974).
44. Schlauch R.M. *Coagulation for Gravity Type Clarification and Thickening* , in W.L.K. Schwoyer, ed., *Polyelectrolites for Water and Wastewater Treatment*, CRC press, Inc., Boca Raton, Fla., 1981, Chapt.4, pp.92-157.
45. Shyluk W.P. and R.W. Smith, J. Polym. Sci. Part A-2 7, 27 (1969).
46. Slater R.W. and J.A. Kitchener, Trans. Faraday Soc. 61, 1026 (1965).
47. Solis Vanegas Bernardo & Morales Galvan Evangelina . "*Diseño de una planta piloto para la remocion de arsenico del agua de pozos, mediante el proceso de coagulacion-floculacion*".

UNAM FQ. Tesis de Lic .1990.

48. Stumm W. and C. O'Melia . *Stoichiometry of Coagulation* . J.Am.Water Works Assoc. 60,514 (1968)
49. Tebbutt T.H. *Fundamentos de Control de la calidad del agua* . Ed. Limusa,1994 .
50. Vázquez Yañez & Orozco Alma /CONACYT (1992) . *La destrucción de la naturaleza* .
51. Verma S.and M.Chaudhuri . *Colloid-Chemical Parameters for coagulant Dose Control* J.Am.Water Works Assoc. 70,102 (1978).
52. Vorchheimer Norman *Synthetic Polyelectrolites* in W.L.K. Schwoyer, ed., *Polyelectrolites for Water and Wastewater Treatment*, CRC press, Inc., Boca Raton,Fla.,1981,pp.1-46 .
53. Weber W.J. *Physicochemical Process for Water Quality Control*, Wiley-Interscience,New York,1972,Chapt.2,pp.61-109.
54. Walzer James G. *Polyelectrolites and Coagulants for the Flotation Processes*, in W.L.K.Schwoyer,ed.,*Polyelectrolites for Water and Wastewater Treatment*, CRC press, Inc., Boca Raton,Fla.,1981,pp.145-158 .