



# Cinara

Centro Inter-Regional  
de Abastecimiento y  
Remoción de Agua  
Cali - Colombia



UNIVERSIDAD DE SAO PAULO  
Escola de Engenharia de Sao Carlos  
Sao Carlos - Brasil

# Uso de Polímeros Naturales en el Tratamiento de Agua para Abastecimiento

Jose Roberto  
Luz Di Bernardo



Planta de Potabilización Río Cali  
Capacidad: 1.8 m<sup>3</sup>/s  
Empresas Municipales de Cali - EMCALI



ORGANIZACION MUNDIAL  
DE LA SALUD  
Oficina Sanitaria Panamericana

Proyectos de Estudio, Desarrollo y  
Transferencia Integral de Tecnología  
Aplicada al Abastecimiento

253-91US-8949



## **CENTRO INTER-REGIONAL DE ABASTECIMIENTO Y REMOCION DE AGUA**

CINARA, es una Fundación sin ánimo de lucro, orientada a la investigación, el desarrollo y la transferencia integral de tecnología en el campo del abastecimiento de agua potable y de la remoción de agua. Su trabajo se dirige principalmente hacia el sector rural, el pequeño y mediano municipio y los asentamientos urbano - marginales, tradicionalmente los más desprotegidos en la prestación de los servicios públicos con criterios de calidad y eficiencia.

En CINARA trabajan ingenieros conjuntamente con personal de las ciencias naturales y sociales, en un esfuerzo integrado con profesionales de las instituciones cooperantes, los líderes del agua y las comunidades mismas, preocupados por el mejoramiento de sus condiciones sanitarias y la preservación de su medio ambiente.

CINARA mantiene un Convenio de Cooperación Académica e Investigativa con la Universidad del Valle y adelanta sus diferentes proyectos mediante convenios o contratos con organizaciones locales, nacionales e internacionales relacionadas con el sector de agua potable y saneamiento ambiental, componente vital en un desarrollo fundamentado en el mejoramiento de la calidad de vida de los asentamientos humanos.

Para información adicional, dirigirse a:

**CENTRO INTER-REGIONAL DE ABASTECIMIENTO Y REMOCION DE AGUA**  
Universidad del Valle - Facultad de Ingeniería A.A. 25157  
Cali, Colombia-Suramérica. Tels. 392345 - 393041 Ext. 153-159  
FAX (57-23) 397264



*República de Colombia*  
*Departamento Nacional de Planeación*



Las actividades de investigación y transferencia de tecnología planificadas en relación con este libro cuentan con la colaboración de las Empresas Municipales de Cali, EMCALI; de la Sociedad de Acueductos y Alcantarillados del Valle, ACUAVALLE y se enmarcan en el Convenio de Cooperación Académica e Investigativa suscrito entre el Ministerio de Salud de Colombia, la Universidad del Valle y CINARA. La presente publicación ha sido realizada gracias al trabajo continuado de CINARA y al patrocinio de diferentes instituciones, entre ellas el Fondo Colombiano de Investigaciones Científicas y Proyectos Especiales Francisco José de Caldas - COLCIENCIAS, establecimiento Público adscrito al Departamento Nacional de Planeación, cuyo objetivo es promover el desarrollo científico y tecnológico en Colombia.

# Uso de Polímeros Naturales en el Tratamiento de Agua para Abastecimiento

José Roberto Campos  
Luiz Di Bernardo

INTERNATIONAL REFERENCE  
CENTRE FOR COMMUNITY WATER SUPPLY  
AND SANITATION (ICWSS)  
P.O. Box 17, 3720 AA The Hague  
Tel. (071) 485111 ext. 141/142

BARCODE 8949

253 gms

**Edición:**

©CINARA, Centro Inter-Regional de Abastecimiento y Remoción de Agua.

Coordinador de la traducción y edición en español  
ALBERTO GALVIS C., Ingeniero Sanitario MSc.

**Diseño y Producción Integral**  
ULTRATEXTOS LTDA., - Cali

Impreso en Colombia, 1991

# Presentación

El árbol de balsa que ilustra el fondo de esta página, está ligado, al igual que el guásimo y el cadillo, a una tradición centenaria entre nosotros. La producción de panela, o raspadura como se le llama en el Brasil, a partir de la caña de azúcar.

La corteza de los árboles mencionados anteriormente, tiene gran importancia en ese proceso productivo para la clarificación de los jugos que salen del trapiche, porque las sustancias mucilaginosas contenidas en estos vegetales, actúan como aglutinadores de los sólidos suspendidos en los jugos, facilitando su posterior retiro.

Esta es solamente una de las prácticas, presente en varios países de nuestra América, donde se usan diferentes plantas que actúan como coagulantes y que hacen parte de la historia local en el empleo de polímeros naturales.

A nivel del sector de abastecimiento de agua, diferentes instituciones han empezado a hacer esfuerzos en la utilización de polímeros naturales en el tratamiento de agua.

De ahí que en 1986, en reunión que agrupó a las entidades vinculadas a la prestación de servicios públicos de abastecimiento y remoción de agua en el Departamento del Valle del Cauca de la República de Colombia, surgió el interés por conocer los alentadores resultados obtenidos por los doctores Jose Roberto Campos y Luiz Di Bernardo de la Escuela de Ingeniería de Sao Carlos, de la Universidad de Sao Paulo, Brasil, en el estudio del uso de polímeros naturales como auxiliares en los procesos de coagulación y filtración en sistemas de potabilización de agua.

El Área de Abastecimiento y Remoción de Agua, la cual evolucionó en lo que hoy es CINARA, desarrolló una primera acción en este sentido organizando en 1987 un Curso Especial, efectuado en Cali, donde los doctores Campos y Di Bernardo presentaron y discutieron sus experiencias. Ese Curso contó con la participación de entidades del suroccidente colombiano y para su ejecución se realizó la traducción de una versión preliminar en portugués del presente documento.

Como consecuencia de un esfuerzo continuado por presentar resultados de investigaciones o experiencias tecnológicas de profesionales en las regiones, CINARA publica ahora una traducción de la mencionada versión preliminar del documento sobre uso de polímeros en el tratamiento de agua.

Para iniciar la segunda etapa de este proyecto en Colombia se propone, con la colaboración de diferentes instituciones, tanto nacionales como internacionales, evaluar a escala de laboratorio, de planta piloto y de prototipo, polímeros naturales de uso tradicional en el país.

Igualmente se propone impulsar la adecuada transferencia de estas experiencias, por medio de la ejecución de proyectos de demostración y la realización de cursos y materiales didácticos dirigidos a diferentes niveles de escolaridad.

Valorar nuestras prácticas tecnológicas, potencializando sus usos, de manera tal que den respuesta a las necesidades del presente, es labor insoslayable para quienes trabajamos por mejores mañanas.

Gerardo Galvis C.  
Director CINARA

## Reconocimientos

Mediante este documento se recuperan y divulgan las experiencias de los doctores José Roberto Campos y Luiz Di Bernardo, de la Escuela de Ingeniería de Sao Carlos de la Universidad de Sao Paulo en Brasil, sobre el aprovechamiento de polímeros naturales para el tratamiento de agua en sistemas de abastecimiento.

La traducción y publicación del material en Colombia fue coordinada por el Ingeniero Alberto Galvis C., profesional del Centro Inter-Regional de Abastecimiento y Remoción de Agua, CINARA y docente adscrito a la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle.

Una primera versión en español fue producida con la colaboración de los ingenieros Iris E. Uribe y Javier E. Fernández y la Tecnóloga Química Piedad López. Esta versión fue revisada por el Ingeniero Rubén D. Pinzón, M.Sc., egresado de la Universidad de Sao Paulo y por la Química Leonor Montes. Para la publicación de la versión final se contó con la colaboración de la Química Pamela Ocampo, M.Sc., egresada de la Universidad del Valle y del ingeniero Luis Fernando Marmolejo.

La producción de este material y el Proyecto dentro del cual se concibió, han sido promovidos por el Ingeniero Gerardo Galvis C., director de CINARA, en coordinación con el profesor Luiz Di Bernardo de la Escuela de Ingeniería de Sao Carlos. Sus primeros contactos se dieron en Lima en 1982, en uno de los cursos especiales organizados en el marco del Programa Regional OPS/EHP/CEPIS de capacitación de recurso humano para el mejoramiento de la calidad del agua y continuaron después en Sao Carlos, en reuniones auspiciadas por la Organización Mundial de la Salud, Oficina Sanitaria Panamericana y el Ministerio de Salud de Colombia, en 1986 y 1988.

Este libro se ha producido en el marco del Convenio de Cooperación Académica y Científica para el desarrollo de tecnologías aplicadas al abastecimiento de agua suscrito con la Universidad de Sao Paulo. El convenio hace parte del conjunto de acciones que adelanta CINARA a nivel nacional e internacional, en coordinación con la Universidad del Valle, para dar cumplimiento a su papel como recurso al servicio del municipio en el sector de agua potable y saneamiento ambiental.

Como se desprende de los principios que guían la acción de CINARA, para la gestión y el cumplimiento de su misión, en este Proyecto se ha contado con la colaboración de diferentes instancias o instituciones del orden local, nacional e internacional. Entre ellas están: las Secciones de Saneamiento Ambiental y Mecánica de Fluidos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle; las Empresas Municipales de Cali, EMCALI; El Servicio Seccional de Salud del Valle; la Sociedad de Acueductos y Alcantarillados del Valle, ACUAVALLE; la Corporación Autónoma Regional del Cauca, CVC; el Ministerio de Salud de Colombia; el Fondo Colombiano de Investigaciones Científicas y Proyectos Especiales Francisco José de Caldas, COLCIENCIAS, adscrito al Departamento Nacional de Planeación; la Organización Mundial de la Salud, Oficina Sanitaria Panamericana, OPS.

# Contenido

	Pág.
<b>1. Introducción</b> .....	5
<b>2. Mecanismos de coagulación</b> .....	7
2.1 Introducción .....	7
2.2 Hidrólisis del aluminio .....	7
2.3 Mecanismos de coagulación .....	8
<b>3. Floculación</b> .....	15
3.1 Introducción .....	15
3.2 Floculación con coagulante primario .....	15
3.2.1 Determinación de la dosis óptima de coagulante .....	15
3.2.2 Optimización de los parámetros de mezcla rápida .....	16
3.2.3 Optimización de los parámetros de floculación .....	16
3.2.4 Efecto de la concentración del coagulante .....	23
3.2.5 Utilización de los parámetros obtenidos en el laboratorio .....	25
3.3 Coagulación - Floculación con polímeros .....	28
<b>4. El almidón como auxiliar</b> .....	34
4.1 Propiedades del almidón .....	34
4.1.1 Generalidades .....	34
4.1.2 Composición del almidón .....	34
4.1.3 Algunas propiedades del almidón .....	38
4.2 Uso del almidón como auxiliar de floculación .....	40
4.2.1 Preparación de la suspensión del almidón .....	40
4.2.1.1 Generalidades .....	40
4.2.1.2 Preparación de la suspensión de almidón en el laboratorio .....	40
4.2.1.3 Preparación de la suspensión de almidón en plantas de tratamiento .....	41
4.2.1.4 Cálculo de la concentración de almidón en el agua para abastecimiento .....	42
4.2.2 Ensayos de laboratorio .....	43
4.2.2.1 Estudios iniciales .....	43
4.2.2.2 Algunos estudios de laboratorio conducentes a la obtención de recursos para el proyecto de reforma de plantas de tratamiento (PT) .....	56
4.2.3 Ensayos en plantas de tratamiento .....	59
4.2.3.1 Introducción .....	59
4.2.3.2 Criterios para la preparación y aplicación del almidón en los períodos de ensayo .....	59
4.2.3.3 Descripción de los resultados iniciales obtenidos en los ensayos realizados en la planta de tratamiento de São Carlos .....	60
4.2.3.3.1 Ensayos con almidón de papa gelatinizado en caliente .....	61
4.2.3.3.2 Ensayos con almidón de araruta gelatinizado con soda cáustica .....	64
4.3 El almidón como auxiliar de filtración .....	71
4.3.1 Consideraciones preliminares .....	71
4.3.2 Resultado del uso del almidón en filtración directa .....	71
<b>5. Referencias bibliográficas</b> .....	82

# Lista de Tablas

	Pág.
Tabla No. 2.1 Reacciones de hidrólisis de aluminio y constantes de equilibrio .....	8
Tabla No. 2.2 Características de las aguas estudiadas .....	10
Tabla No. 2.3 Parámetros y valores obtenidos en los ensayos preliminares para las aguas tipo I y tipo II .....	12
Tabla No. 3.1 Parámetros obtenidos en los ensayos preliminares para las aguas tipo I y tipo II .....	15
Tabla No. 3.2 Dosis óptimas de sulfato de aluminio y valores de pH de coagulación .....	16
Tabla No. 3.3 Parámetros y valores óptimos de mezcla rápida .....	16
Tabla No. 3.4 Ecuaciones que relacionan el gradiente óptimo de velocidad con el período de floculación .....	22
Tabla No. 3.5 Eficiencia en la remoción de turbiedad y color en función de los mecanismos de coagulación, para las aguas estudiadas .....	22
Tabla No. 3.6 Parámetros de mezcla rápida, floculación y dosis de coagulante para los ensayos de verificación del efecto de la concentración del coagulante .....	23
Tabla No. 3.7 Valores de eficiencia en la remoción de turbiedad o color y gradiente óptimo de velocidad .....	26
Tabla No. 3.8 Valores de las constantes KA y KB .....	26
Tabla No. 4.1 Porcentaje de almidón, proteínas, fibras y ceniza de algunas fuentes de almidón .....	34
Tabla No. 4.2 Porcentaje de amilosa existente en el almidón de algunos vegetales .....	35
Tabla No. 4.3 Número de monómeros en las fracciones de almidón .....	37
Tabla No. 4.4 Algunos componentes, diferentes de carbohidratos, presentes en el almidón de diversas fuentes .....	39
Tabla No. 4.5 Principales características de las muestras estudiadas .....	43
Tabla No. 4.6 Valores de las constantes KA, KB y KC .....	47
Tabla No. 4.7 Intervalo de variación de las principales características de las muestras estudiadas .....	48
Tabla No. 4.8 Características de las muestras empleadas en los ensayos de floculación .....	50
Tabla No. 4.9 Resumen de los mejores resultados .....	55
Tabla No. 4.10 Principales características de las muestras estudiadas (Taubaté-S.P.-Brasil) .....	58
Tabla No. 4.11 Principales características de las muestras estudiadas (Presidente Prudente, S.P., Brasil) .....	58
Tabla No. 4.12 Consumo diario de almidón de papa (caudal de agua tratada: 430 l/s) .....	61
Tabla No. 4.13 Cuadro comparativo de los resultados obtenidos en las diferentes etapas de ensayos en la planta de tratamiento de São Carlos, S.P. ....	64
Tabla No. 4.14 Resultados de los ensayos que presentaron mayor eficiencia .....	65
Tabla No. 4.15 Control de la planta de tratamiento, período anterior a los ensayos con almidón. (Tiempo de floculación: 44.7 minutos) .....	67
Tabla No. 4.16 Control de la planta de tratamiento, utilizando 1.0 mg/l de almidón (Tiempo de floculación: 22.4 minutos) .....	68
Tabla No. 4.17 Control de la planta de tratamiento, empleando 0.5 mg/l de almidón. (Tiempo de floculación: 22.4 minutos), y 80% de la dosis de sulfato de aluminio y cal utilizadas normalmente para las condiciones de turbiedad y color del agua cruda .....	69
Tabla No. 4.18 Características promedias (color, turbiedad y sólidos sedimentales) observadas durante el período de control de la planta de tratamiento de São Carlos .....	70
Tabla No. 4.19 Resultados del uso de almidón de papa como ayudante en filtración directa descendente .....	71
Tabla No. 4.20 Uso del almidón como auxiliar de filtración .....	76



# Lista de Figuras

Figura No. 2.1	Relación entre la concentración de coloides y la dosis de coagulante para floculación y sedimentación .....	9
Figura No. 2.2	Diagrama de estabilidad y evaluación de la movilidad electroforética a pH 7,0, de la sílica sintética 0 x 50 .....	9
Figura No. 2.3	Diagrama de proyecto y operación para coagulación con sulfato de aluminio .....	10
Figura No. 2.4	Diagrama de coagulación que contiene valores de turbiedad residual como porcentaje de la turbiedad inicial-agua tipo I .....	11
Figura No. 2.5	Diagrama de eficiencia de la coagulación-agua tipo II .....	11
Figura No. 2.6	Diagrama de coagulación que presenta valores de movilidad electroforética .....	12
Figura No. 2.7	Variación de la movilidad electroforética y turbiedad residual en función de la dosis de sulfato de aluminio para pH constante e igual a 4.65 .....	13
Figura No. 2.8	Variación de la movilidad electroforética (m.e.) y turbiedad residual en función del pH para dosis de sulfato de aluminio constante e igual a 12 mg/l .....	14
Figura No. 3.1	Curvas de variación de la turbiedad residual en función del gradiente de velocidad para varios periodos de floculación; agua tipo I; mecanismo de coagulación: adsorción (dosis = 10 mg/l; pH = 4.8); periodo de sedimentación: 5 min .....	17
Figura No. 3.2	Curvas de variación de la turbiedad residual en función del gradiente de velocidad para varios periodos de floculación; agua tipo I; mecanismo de coagulación: barrido (dosis = 60 mg/l; pH = 6.55); periodo de sedimentación: 5 min .....	17
Figura No. 3.3	Curvas de variación del color aparente residual en función del gradiente de velocidad para varios periodos de floculación; agua tipo II; mecanismo de coagulación: adsorción (dosis = 20 mg/l; pH = 4.40 ); periodo de sedimentación: 10 min .....	18
Figura No. 3.4	Curvas de variación del color aparente residual en función del gradiente de velocidad para varios periodos de floculación; agua tipo II; mecanismo de coagulación: barrido (dosis 140 mg/l; pH = 6.15); periodo de sedimentación: 5 min .....	18
Figura No. 3.5	Curvas de variación del gradiente óptimo de velocidad en función del periodo de floculación - Modelo de Andreu-Villegas & Letterman; agua tipo I; mecanismos de coagulación: adsorción y barrido .....	19
Figura No. 3.6	Curvas de variación del gradiente óptimo de velocidad en función de periodo de floculación - Modelo de Andreu-Villegas & Letterman; agua tipo II; mecanismos de coagulación: adsorción y barrido .....	19
Figura No. 3.7	Curvas de variación del gradiente óptimo de velocidad en función de $(1/T)^n$ para el agua tipo I; mecanismos de coagulación: adsorción y barrido .....	20
Figura No. 3.8	Curvas de variación del gradiente óptimo de velocidad en función de $(1/T)^n$ para aguas tipo II; mecanismos de coagulación: adsorción y barrido .....	20
Figura No. 3.9	Curvas de variación de $(G^* - G')$ en función del periodo de floculación - modelo propuesto - agua tipo I; mecanismos de coagulación: adsorción y barrido .....	21
Figura No. 3.10	Curvas de variación de $(G^* - G')$ en función del periodo de floculación - modelo propuesto - agua tipo II; mecanismos de coagulación: adsorción y barrido .....	21
Figura No. 3.11	Curvas de variación de la turbiedad residual mínima en función del periodo de floculación para el agua tipo I; mecanismos de coagulación: adsorción y barrido .....	22
Figura No. 3.12	Curvas de variación del color aparente residual mínimo en función del periodo de floculación para el agua tipo II; mecanismos de coagulación: adsorción y barrido .....	23
Figura No. 3.13	Variación del porcentaje de la turbiedad del agua preparada que sedimenta con velocidad menor que la establecida, en función de la concentración de la solución de sulfato de aluminio; agua tipo I; mecanismos de coagulación: adsorción (dosis = 10 mg/l; pH = 4.8) .....	24
Figura No. 3.14	Variación del porcentaje de turbiedad del agua preparada que sedimenta a velocidad menor que la establecida, en función de la concentración de la solución de sulfato de aluminio; agua tipo I; mecanismo de coagulación: barrido (dosis = 60 mg/l; pH = 6.55) .....	24
Figura No. 3.15	Variación del porcentaje de color aparente del agua preparada que sedimenta con velocidad menor que la establecida, en función de la concentración de la solución de sulfato de aluminio; agua tipo II; mecanismo de coagulación: adsorción (dosis = 20 mg/l; pH = 4.4) .....	25
Figura No. 3.16	Variación del porcentaje de color aparente del agua preparada que sedimenta con velocidad menor que la establecida, en función de la concentración de la solución de sulfato de aluminio; agua tipo II; mecanismo de coagulación: barrido (dosis = 140 mg/l; pH = 6.25) .....	25
Figura No. 3.17	Correlación entre eficiencia de floculación, número de cámaras (m) y los parámetros G y Td (Argaman & Kaufman) .....	27
Figura No. 3.18	Ejemplos de polímeros empleados como ayudantes en el tratamiento de aguas de abastecimiento .....	29

	Pág.
Figura No. 3.19 Representación esquemática de la desestabilización de los coloides por los polímeros	31
Figura No. 4.1 Estructura de la glucosa y su forma simplificada de notación	36
Figura No. 4.2 Estructura (simplificada) de las moléculas lineales de almidón: amilosa	37
Figura No. 4.3 Estructura (simplificada) de las moléculas ramificadas de almidón: amilopectina	37
Figura No. 4.4 Curvas de transmitancia de soluciones que contienen complejos de yodo-amilosa y de yodo - amilopectina. Concentración de yodo 0.00005 M. Concentración de almidón o fracciones 0.01% (A: amilopectina de papa; B: amilopectina de maíz; C: amilosa de maíz y D: amilosa de papa)	38
Figura No. 4.5 Modelo simplificado que muestra la disposición helicoidal de la cadena lineal de almidón con moléculas de yodo en su eje	38
Figura No. 4.6 Ejemplo de una instalación para preparación y dosificación de soluciones de polímeros comerciales	41
Figura No. 4.7 Curvas de sedimentabilidad correspondientes a los resultados de algunos ensayos de floculación: agua tipo III	44
Figura No. 4.8 Curvas de sedimentabilidad correspondientes a los resultados de algunos ensayos de floculación: agua tipo IV	45
Figura No. 4.9 Curvas de sedimentabilidad correspondientes a los resultados de algunos ensayos de floculación: agua tipo V	45
Figura No. 4.10 Curvas de sedimentabilidad correspondientes a los resultados de algunos ensayos de floculación: agua tipo VI	46
Figura No. 4.11 Curvas de sedimentabilidad: almidón de araruta gelatinizado con hidróxido de sodio. Agua tipo VII	51
Figura No. 4.12 Curvas de sedimentabilidad: almidón de araruta gelatinizado en caliente. Agua tipo VII	52
Figura No. 4.13 Curvas de sedimentabilidad: almidón de yuca gelatinizado con hidróxido de sodio. Agua tipo VIII	52
Figura No. 4.14 Curvas de sedimentabilidad: almidón de araruta gelatinizado en caliente. Agua tipo VIII	53
Figura No. 4.15 Curvas de sedimentabilidad: almidón de papa gelatinizado con hidróxido de sodio. Agua tipo IX	53
Figura No. 4.16 Curvas de sedimentabilidad: almidón de papa gelatinizado en caliente. Agua tipo IX	54
Figura No. 4.17 Curvas de sedimentabilidad: almidón de cará gelatinizado con hidróxido de sodio. Agua tipo X	54
Figura No. 4.18 Curvas de sedimentabilidad: almidón de araruta gelatinizado en caliente. Agua tipo X	55
Figura No. 4.19 Curvas de sedimentabilidad en función de la turbiedad remanente utilizando diferentes polímeros. Dosis de sulfato de aluminio: 35 mg/l	57
Figura No. 4.20 Curvas de sedimentabilidad en función de la turbiedad remanente utilizando diferentes polímeros. Dosis de sulfato de aluminio: 28 mg/l	57
Figura No. 4.21 Eficiencia de remoción de la turbiedad en función de la dosis de almidón de papa	59
Figura No. 4.22 Esquema de la planta de tratamiento de São Carlos, S.P.	61
Figura No. 4.23 Turbiedad del agua cruda y filtrada, y pérdida de carga en el medio filtrante en función del tiempo de operación	72
Figura No. 4.24 Turbiedad del agua cruda y filtrada, y pérdida de carga en el medio filtrante en función del tiempo de operación (sin la utilización de auxiliares de filtración)	72
Figura No. 4.25 Método de operación: sin descargas periódicas. Tasa de filtración: 120 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> . día	73
Figura No. 4.26 Método de operación: sin descargas periódicas. Tasa de filtración: 180 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> . día	73
Figura No. 4.27 Método de operación: sin descargas periódicas. Tasa de filtración: 240 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> . día	74
Figura No. 4.28 Método de operación: con descargas periódicas. Tasa de filtración: 120 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> . día	74
Figura No. 4.29 Método de operación: con descargas periódicas. Tasa de filtración: 180 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> . día	75
Figura No. 4.30 Método de operación: con descargas periódicas. Tasa de filtración: 240 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> . día	75
Figura No. 4.31 Resultados de operación. Ensayo No. 01	77
Figura No. 4.32 Resultados de operación. Ensayo No. 02	77
Figura No. 4.33 Resultados de operación. Ensayo No. 03	78
Figura No. 4.34 Resultados de operación. Ensayo No. 04	78
Figura No. 4.35 Resultados de operación. Ensayo No. 05	79
Figura No. 4.36 Resultados de operación. Ensayo No. 06	79
Figura No. 4.37 Resultados de operación. Ensayo No. 07	80
Figura No. 4.38 Resultados de operación. Ensayo No. 08	80
Figura No. 4.39 Resultados de operación. Ensayo No. 09	81
Figura No. 4.40 Resultados de operación. Ensayo No. 10	81

# 1. Introducción

La utilización de polielectrolitos en el tratamiento de agua parece haber comenzado hace aproximadamente 4000 años. Algunas referencias en sánscrito mencionan que una goma extraída de las semillas de un árbol (Nirmali, o *Strychnos potatorum*) era usada en la India para la clarificación, alrededor del año 2000 A.C. El efecto coagulante de esta goma se debe a la presencia de algunos polímeros orgánicos solubles en el agua<sup>(49)</sup>.

A partir de la década del sesenta, se presentó un importante desarrollo en el conocimiento y un incremento en la aplicación de polímeros sintéticos para el tratamiento de aguas de abastecimiento y residuales. A pesar de los beneficios obtenidos con el uso de los polímeros, se deben considerar dos preguntas esenciales:

i) ¿Se conocen realmente todas las relaciones entre la utilización de polímeros sintéticos y la salud de la población?

ii) ¿La utilización de polímeros naturales podrá ser competitiva, técnica y económicamente, en comparación con los polímeros sintéticos?

La primera pregunta ha sido motivo de preocupación, desde hace algún tiempo, para la Organización Mundial de la Salud, OMS, por los eventuales problemas de salud resultantes de la presencia de monómeros o productos intermedios existentes en el agua tratada. La aparición de estas "impurezas" puede ser provocada por cualquier pequeña falla en el control de las condiciones bajo las cuales se efectúe la polimerización. Es evidente que este hecho sólo es perjudicial cuando los productos indeseables ofrecen peligro para la salud del consumidor.

En los Estados Unidos, antes de que un producto auxiliar sea empleado a gran escala en el tratamiento de agua para abastecimiento, es necesario someterlo a la aprobación de la entidad responsable de la salud pública, después de que se ha comprobado científicamente la imposibilidad de ocurrencia de efectos fisiológicos adversos a los consumidores. La primera reglamentación oficial para la aprobación o rechazo de estos productos, surgió del trabajo de una comisión de la "United States Public Health Service", USPHS, convocada por la "American Water Works Association", AWWA, en el año de 1957. Esta comisión estableció una serie de requisitos que deberían ser cumplidos rigurosamente para conseguir la aprobación de un determinado producto. Entre otras, el fabricante debía suministrar las siguientes informaciones: propiedades químicas del producto, condiciones de uso, evidencia de no toxicidad, resultados de estudios relacionados con el metabolismo, estudios acerca de la presencia de compuestos carcinogénicos y mutagénicos, etc. Los ensayos orientados a la verificación de efectos dañinos para la salud no son necesarios, únicamente en el caso de que estos productos hayan sido utilizados normalmente en la preparación de alimentos.

En Alemania, el rigor de las leyes ha dificultado el uso de algunas sustancias, tales como alguicidas, flúor, polielectrolitos, que ya son usadas en otros países. Para verificar, por ejemplo, si el empleo de las poliacrilamidas podría causar daño, se utilizó una planta piloto, la cual funcionó durante más de dos años en Leipheim, tratando agua del río Danubio, con una dosis promedio de 0.25 mg/l. Este trabajo presentó resultados que autorizaron la utilización de dosis inferiores a 0.50 mg/l de poliacrilamidas que contengan como máximo 0.1% del monómero (acrilamida y ácido acrílico).

En Francia, el único producto que puede ser empleado sin restricciones como auxiliar en el tratamiento de aguas para abastecimiento, es el alginato.

La introducción de un nuevo producto, sintético o natural, en el tratamiento del agua, siempre exige gran responsabilidad por parte de las autoridades sanitarias, pues, por bueno que sea el control de las operaciones y de los procesos involucrados, lo cierto es que, generalmente, el agua tratada contiene residuos que serán ingeridos por los consumidores. De esta manera, el empleo de polímeros naturales, reconocidamente no perjudiciales para la salud, debe ser investigado y estimulado de forma tal que productos potencialmente peligrosos puedan ser sustituidos con ventajas, teniendo en cuenta principalmente, el aspecto de salud pública. Además, como los polímeros naturales, en la mayoría de los casos, se obtienen fácilmente sin la utilización de procesos químicos complejos, es evidente que su empleo puede resultar más atractivo que el de los polímeros sintéticos, considerando, también, el aspecto económico.

Con base en estas consideraciones iniciales, el presente manual, relacionado con el uso de polímeros como auxiliares en la clarificación de las aguas, incluye el estudio de polímeros de manera general, pero se le da un mayor énfasis a los polímeros naturales.

Actualmente se conocen muchos productos naturales que presentan características de polielectrolitos, tales como: compuestos de celulosa, almidón y derivados, polisacáridos, alginato (extraído de algas marinas pardas: *Phaeophyceae*), goma extraída de cactus (*Opuntia ficus indica*), gelatina común, goma de Guar (extraída de semillas de *Cyanopsis psoraloides*), etc.

Dentro de los polímeros naturales citados, el almidón será considerado con mayor énfasis, pues ya se dispone de muchos resultados de investigaciones y aplicaciones prácticas, principalmente en el Brasil, donde este polímero viene siendo estudiado con este fin, en la Escuela de Ingeniería de São

En la EESC-USP, los estudios se iniciaron a partir del conocimiento de un trabajo de LaMer en el cual se menciona que a mediados de la década del treinta, dos investigadores holandeses (Van Stersson y Overbeek) descubrieron que los efluentes del lavado del carbón podrían ser tratados mediante la adición de almidón, antes de ser vertidos a un cuerpo receptor. En este trabajo, LaMer también describe una experiencia, desarrollada por él mismo, que se constituyó en un gran acontecimiento al obtener buenos resultados en la floculación con almidón de papa de los efluentes provenientes de las operaciones de pulverización y lavado de rocas que contenían  $U_2O_3$ . El objetivo de la floculación, en este caso, era posibilitar la retención de partículas finas arrastradas en la operación de lavado, para permitir la posterior recuperación del uranio que de otra forma se perdería<sup>159</sup>. Estos ejemplos muestran la aplicabilidad del almidón de papa, en la floculación de suspensiones que contengan una elevada concentración de partículas minerales de tamaño coloidal. Con base en este conocimiento, era lógico inferir que el almidón de papa también podría ser empleado, con éxito, como auxiliar de floculación en el tratamiento de aguas para abastecimiento.

Los primeros ensayos de floculación para evaluar la aplicabilidad de un polímero natural específico (almidón de papa) fueron realizados en 1973 en la EESC-USP. Posteriormente, se efectuaron varios trabajos a nivel de laboratorio y en plantas de tratamiento para estudiar diversos polímeros naturales (almidones de papa, araruta, arroz, maíz, yuca, etc.) como auxiliares de floculación. Paralelamente, también se estudió el uso de almidón, como auxiliar de filtración (filtración descendente de agua decantada, filtración directa ascendente y filtración directa descendente).

En los capítulos siguientes se presentarán algunos fundamentos de coagulación-floculación, con y sin el uso de polímeros como auxiliares. Se describirán también experiencias con la utilización de almidón de diversas fuentes naturales, como auxiliar de floculación y filtración.

Actualmente se encuentra en desarrollo, en la EESC-USP, una nueva metodología para el estudio de la aplicación de polímeros sintéticos y naturales como auxiliares de floculación con base en el uso del diagrama de coagulación.

## 2. Mecanismos de Coagulación

### 2.1 Introducción

La agregación de las partículas de una suspensión coloidal o de las impurezas del agua cruda resulta de la acción conjunta de dos fenómenos: la desestabilización de las partículas y el transporte de las mismas para permitir el contacto entre ellas. En cuanto al transporte, es esencialmente un fenómeno físico, ocasionado principalmente por la difusión, el movimiento del fluido y la sedimentación. La desestabilización, es un proceso predominantemente químico, controlado por las características físicas y químicas del medio.

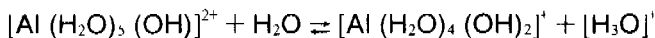
Para remover las partículas de una suspensión, los productos de la hidrólisis, resultantes de adicionar el coagulante, deben desestabilizarse por mecanismos actualmente aceptados como de adsorción y barrido de partículas en precipitados metálicos. En este capítulo, se discutirá únicamente la coagulación con sulfato de aluminio.

### 2.2 Hidrólisis del aluminio

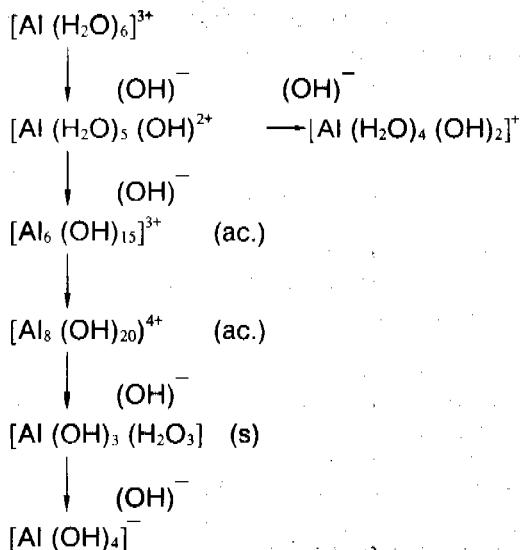
En medio acuoso, el equilibrio ácido-base para el aluminio es:



Cuando ocurre la transferencia de un protón hacia la molécula del solvente ( $\text{H}_2\text{O}$ ), se produce la conversión a hidróxido, como lo muestra la siguiente expresión:



Dependiendo del pH del medio acuoso y de las constantes de equilibrio involucradas, puede ocurrir una gran variedad de reacciones de hidrólisis, conforme lo muestra el esquema siguiente, donde es evidente el carácter ácido del ion aluminio en solución acuosa:



Aunque se han realizado muchas investigaciones sobre la hidrólisis de las sales de aluminio, la composición de las especies hidrolizadas no se conoce con certeza, sin embargo se han empleado diversos métodos con el fin de definir esta composición, tales como medición de pH, titulaciones potenciométricas, crioscopia, difusión, cinética de las reacciones, conductividad, etc. También se ha sugerido la formación de diversas especies complejas de aluminio, iónicas y neutras, mono-moleculares y poli-nucleares:  $[\text{Al}_6(\text{OH})_{15}]^{3+}$ ;  $[\text{Al}_8(\text{OH})_{20}]^{4+}$ ;  $[\text{Al}_7(\text{OH})_{17}]^{4+}$ ;  $[\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}]^{3+}$ . Algunas de estas especies pueden ser obtenidas a través de las reacciones de hidrólisis mostradas en la Tabla No. 2.1, donde las moléculas de agua de coordinación fueron omitidas por simplicidad. Se incluyen en esta tabla las constantes de equilibrio de las diferentes reacciones.

**Tabla No. 2.1. Reacciones de hidrólisis de aluminio y constantes de equilibrio <sup>(03)</sup>**

Reacción	Log(K)
$Al^{3+} + H_2O \rightleftharpoons [Al(OH)]^{2+} + H^+$	— 5,03
$2Al^{3+} + 2H_2O \rightleftharpoons [Al_2(OH)_2]^{4+} + 2H^+$	— 6,27
$Al^{3+} + 3H_2O \rightleftharpoons Al(OH)_3(s) + 3H^+$	— 9,1
$Al(OH)_3(s) + H_2O \rightleftharpoons [Al(OH)_4]^- + H^+$	— 12,74
$8Al^{3+} + 20H_2O \rightleftharpoons [Al_8(OH)_{20}]^{4+} + 20H^+$	— 68,7
$6Al^{3+} + 15H_2O \rightleftharpoons [Al_6(OH)_{15}]^{3+} + 15H^+$	— 47
$Al(OH)_3(s) \rightleftharpoons Al^{3+} + 3OH^-$	— 32,3

La constante de equilibrio para una determinada reacción está dada por expresiones de este tipo:

$$K = \frac{([Al_8(OH)_{20}]^{4+}) \cdot [H^+]^{20}}{[Al^{3+}]^8}$$

### 2.3. Mecanismos de coagulación

La coagulación de las aguas para abastecimiento, mediante el uso de sales de aluminio, ocurre con el predominio de dos mecanismos:

- i) Adsorción de especies solubles hidrolizadas, causando desestabilización; o neutralización.
- ii) Barrido, resultante del arrastre de partículas en los precipitados de aluminio.

Bajo determinadas condiciones de la solución de coagulante (pH, temperatura, concentración de aluminio, edad de la solución, etc.), los productos de la hidrólisis tienen cargas diferentes y son adsorbidos más fácilmente que el ión metálico no hidrolizado. Esta tendencia a la adsorción se acentúa para las especies polihidroxidas y poli-nucleares, pudiendo ser atribuida a las siguientes causas:

- i) Las especies hidrolizadas son más grandes y menos hidratadas que las no hidrolizadas correspondientes.
- ii) Con la presencia de grupos hidróxidos coordinados, hay mejores condiciones de adsorción.

Sin embargo, las dosis de coagulante normalmente utilizadas en la práctica y los correspondientes valores de pH, ocurren en regiones de supersaturación con respecto al hidróxido metálico, lo cual no implica que la precipitación de esta especie ocurra rápidamente, puesto que se debe alcanzar un cierto grado de supersaturación, que depende de la temperatura y la concentración de los coloides en la suspensión. En la región localizada por encima de esta supersaturación crítica, se producirá la formación de un precipitado amorfo, capaz de envolver las impurezas del agua y removerlas por sedimentación. Así, se considera que, con una baja concentración de coloides, no existe un número suficiente de partículas para propiciar la oportunidad de contacto en un tiempo razonable.

Estos dos mecanismos se pueden visualizar en gráficas, donde se incluyen parámetros tales como: dosis de coagulante, concentración de coloides y pH. La Figura No. 2.1 muestra cómo la concentración de coloides afecta la coagulación, que puede ocurrir por barrido (zona 4) o por adsorción (zona 2). En la zona 1, la dosis de coagulante es insuficiente para inducir una coagulación eficiente, y en la zona 3, ocurre reestabilización de las partículas coloidales. La Figura No. 2.2 (a) muestra en un gráfico tridimensional, la relación entre concentración de coloides, turbiedad y dosis necesaria de coagulante para obtener una eficiencia satisfactoria en la reducción de la turbiedad. La Figura No. 2.2 (b) está en correspondencia con la 2.2 (a), con la diferencia de que en ella se puede observar lo que ocurre con la movilidad electroforética debida a la adición del coagulante<sup>(01)</sup>.

Recientemente, fue propuesta una nueva forma de presentación de los resultados de los ensayos de coagulación-floculación, con la elaboración de un diagrama donde está el pH en la abscisa, la dosis de coagulante en la ordenada, y se muestran las diversas especies complejas de aluminio y la eficiencia en la remoción de turbiedad y color. La Figura No. 2.3 muestra este diagrama, donde se verifica la presencia de regiones bien diferenciadas, en función del pH final, para las cuales la coagulación, con una cierta dosis de coagulante, puede producir resultados satisfactorios.

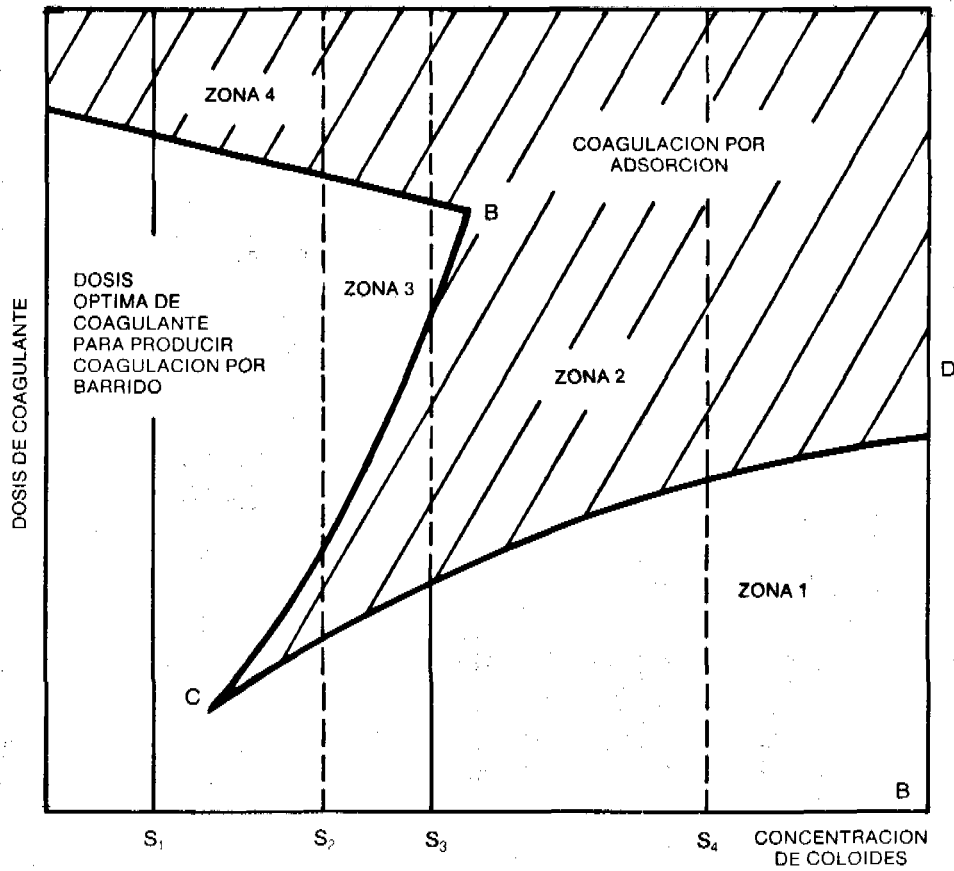


Fig. No. 2.1. Relación entre la concentración de coloides y la dosis de coagulante para floculación y sedimentación<sup>(83)</sup>

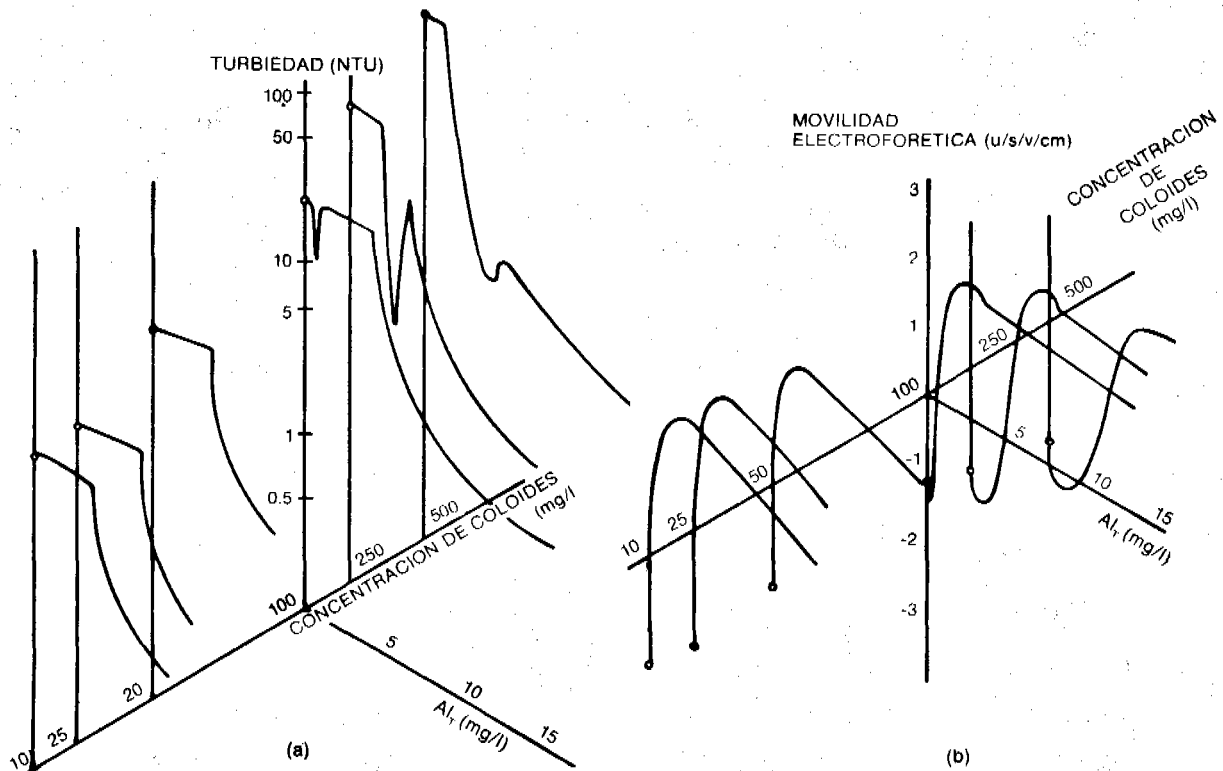


Fig. No. 2.2. Diagrama de estabilidad y evaluación de la movilidad electroforética a pH 7.0, de la sílica sintética 0 x 50<sup>(11)</sup>

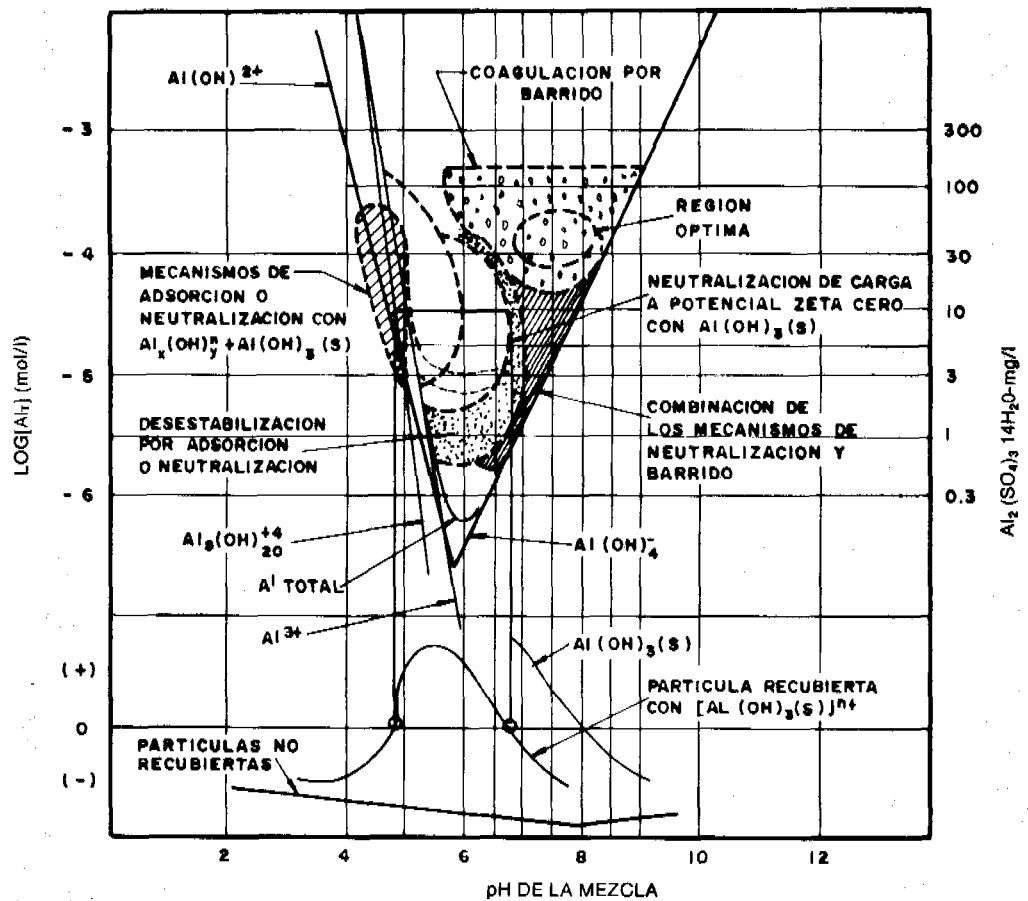


Fig. No. 2.3. Diagrama de proyecto y operación para coagulación con sulfato de aluminio.<sup>(33)</sup>

Las Figuras Nos. 2.4 y 2.5 muestran los resultados de una investigación experimental realizada recientemente, para dos tipos de agua, cuyas características se presentan en la Tabla No. 2.2<sup>(32)</sup>.

Tabla No. 2.2 Características de las aguas estudiadas.

CARACTERISTICA	AGUA TIPO I	AGUA TIPO II
Color aparente (un. Pt-Co)	—	132
Color verdadero (un. Pt-Co)	5	100
Turbiedad (UT)	200	5
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /l)	30	40
Temperatura (°C)	18-20	19-23
Movilidad Electroforética (μ/s/V/cm)	-2.81	—
Conductividad Específica (μ mho/cm)	72.5	—
pH	7.5	7.5
Sustancias Húmicas (mg/l)	7.0	141.0



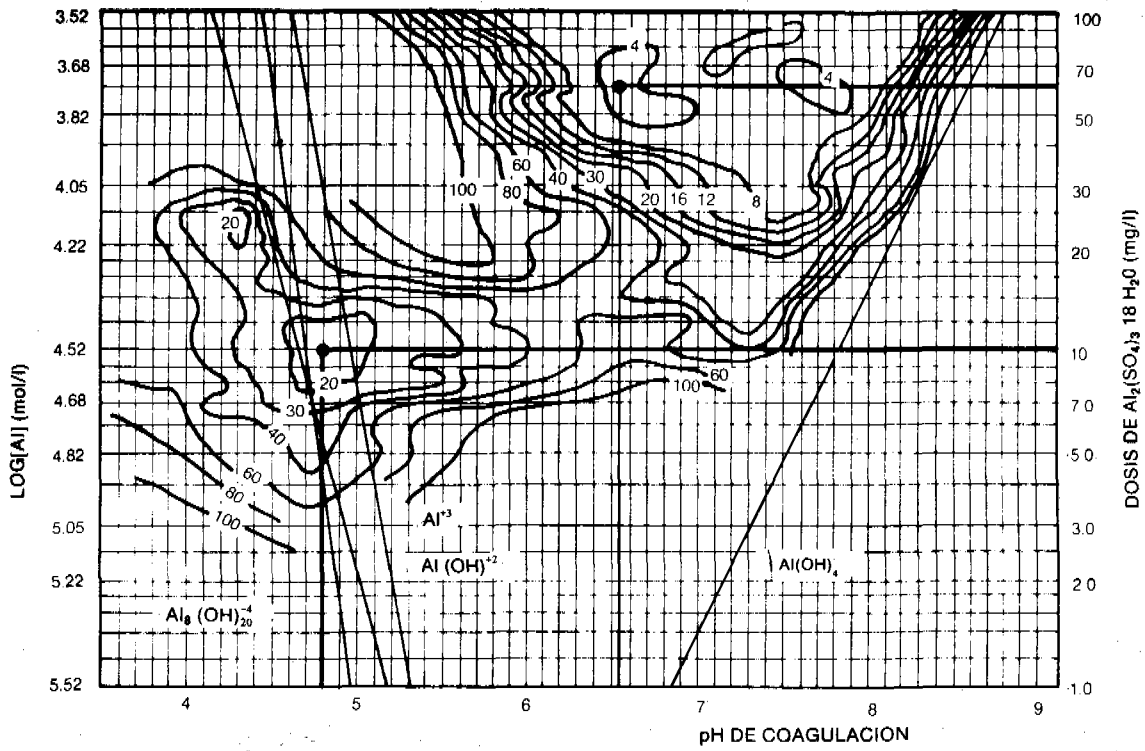


Fig. No. 2.4. Diagrama de coagulación que contiene valores de turbiedad residual como porcentaje de la turbiedad inicial - Agua Tipo I<sup>(32)</sup>.

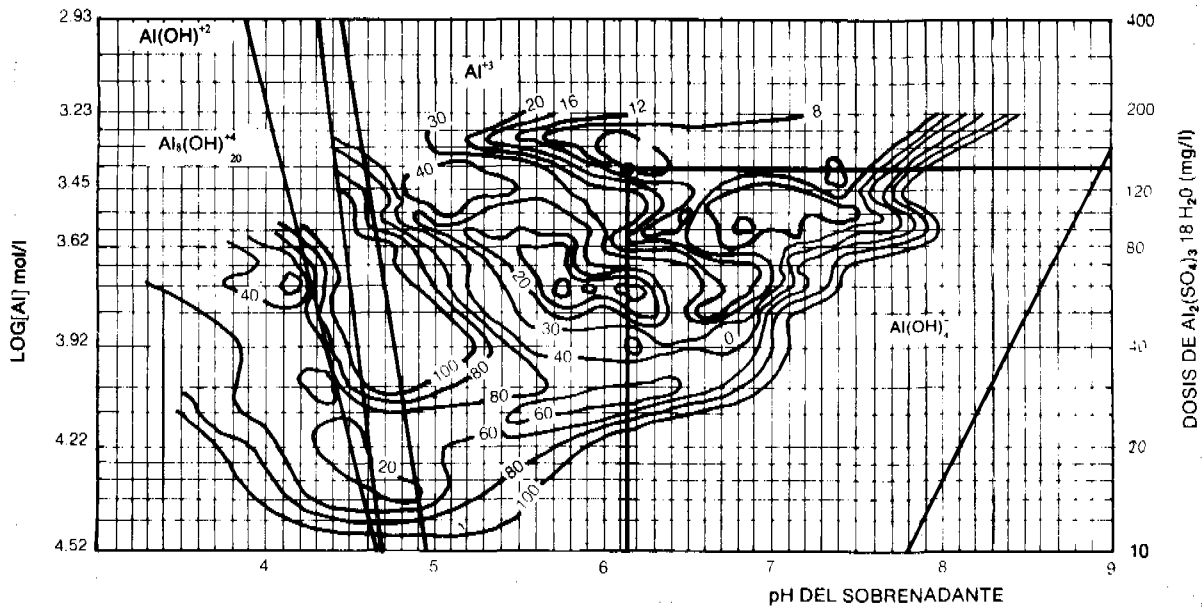


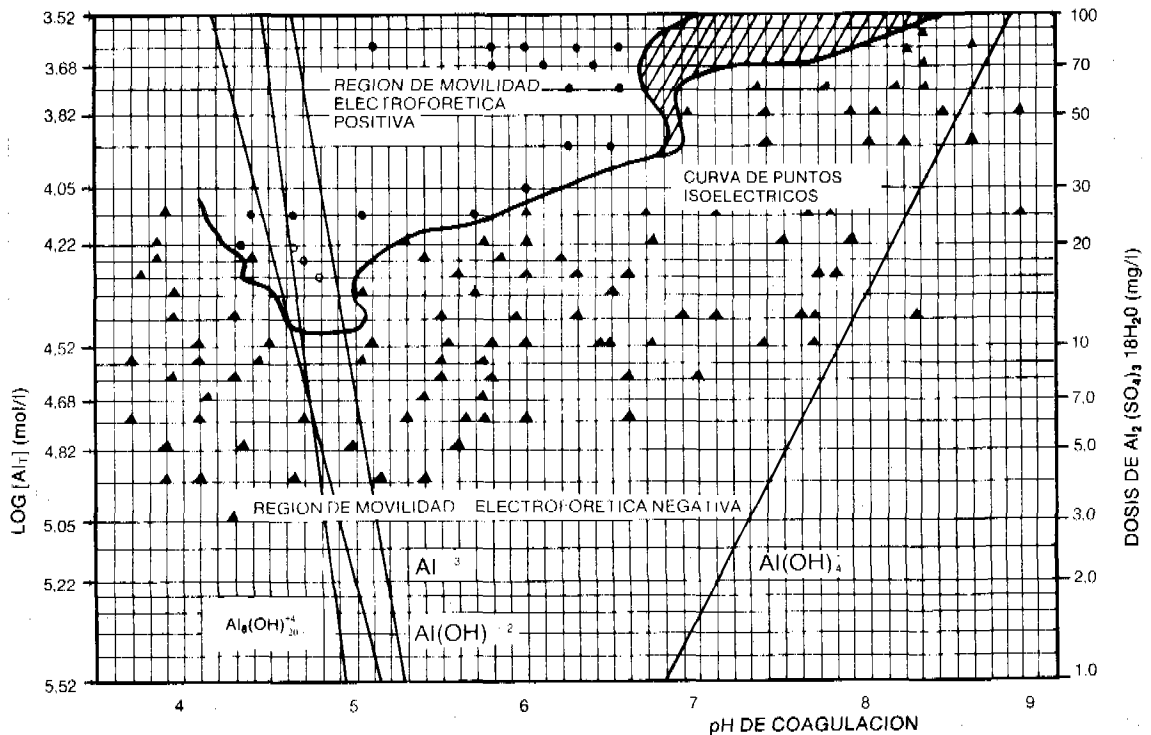
Fig. No. 2.5. Diagrama de eficiencia de la coagulación - Agua Tipo II<sup>(32)</sup>.

La construcción de los diagramas de las Figuras Nos. 2.4 y 2.5 se realizó con base en los parámetros y valores constantes respectivos de la Tabla No. 2.3.

**Tabla No. 2.3** Parámetros y valores obtenidos en los ensayos preliminares para las aguas tipo I y tipo II.

Proceso de Operación	Gradiente de Velocidad (s <sup>-1</sup> )		Tiempo de Mezcla (s)		Velocidad de Sedimentación para recolección de Muestra (cm/min)
	Tipo I	Tipo II	Tipo I	Tipo II	
Mezcla rápida	900	900	5	5	—
Floculación	30	15	1200	1800	—
Sedimentación	—	—	—	—	1.0

En las Figuras Nos. 2.4 y 2.5 se presentan los diagramas de coagulación, donde se tiene el pH final en las abcisas y la dosis de coagulante (aluminio total o sulfato de aluminio) en las ordenadas, para los dos tipos de agua estudiada. Con las constantes de equilibrio de la Tabla No. 2.1 se trazaron las rectas de los productos de hidrólisis del sulfato de aluminio, en función del pH. La Figura No. 2.6 es similar a la Figura No. 2.4, con la diferencia de que, en vez de la turbiedad residual, se presenta la movilidad electroforética.



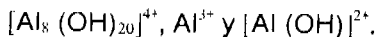
**Fig. No. 2.6.** Diagrama de coagulación que presenta valores de movilidad electroforética<sup>(32)</sup>.

Las Figuras Nos. 2.4 y 2.5 muestran que, para las aguas estudiadas, existen dos regiones bien diferenciadas donde la coagulación es eficiente. La zona de adsorción se encuentra entre los pares de valores, dosis de coagulante y pH, iguales a (8; 4.6) - (12; 5.1) y (15; 4.2) - (30; 4.9) para las aguas tipo I y tipo II, respectivamente. Es interesante observar en la Figura No. 2.4 que para valores de pH alrededor de 4.4 y dosis de coagulante alrededor de 25 mg/l, también se obtuvieron valores de turbiedad residual iguales a los incluidos en la franja anteriormente mencionada para el agua tipo I. Para el agua tipo II, se

obtuvo una eficiencia, en la remoción, semejante a la obtenida con una dosis de 60 mg/l, pero, con un pH inferior a 4.4.

La Figura No. 2.6 muestra que para las dos regiones, la movilidad electroforética (m.e) está próxima a cero. En esta figura también se muestra la curva de los puntos isoeléctricos. Los valores de la m.e. varían aproximadamente entre -4 y +2  $\mu\text{mho/cm}$ , pero, en las dos regiones, para las cuales se obtienen buenos resultados, los valores de la m.e. son ligeramente negativos o positivos.

La Figura No. 2.7 muestra la turbiedad residual y la movilidad electroforética en función de la dosis de sulfato de aluminio para el agua tipo I, manteniendo el pH constante e igual a 4.65. En la Figura No. 2.8, la dosis de sulfato de aluminio se fijó en 12 mg/l y se varió el pH final del agua en estudio. El análisis conjunto de las Figuras Nos. 2.7 y 2.8 muestra que, realmente, la mayor eficiencia en la remoción de turbiedad se puede conseguir con valores de pH próximos a 4.8 y dosis de sulfato de aluminio de 10 mg/l. Para estas condiciones, los principales productos de hidrólisis del aluminio, que pueden estar causando la desestabilización o neutralización de las partículas coloidales son:



La región de coagulación por barrido es más eficiente que la de adsorción para producir sedimentación, tal como se puede observar en las Figuras Nos. 2.4 y 2.5 para ambos tipos de agua. En esta región, la remoción de turbiedad comienza a acentuarse para dosis de coagulante superiores a 15 mg/l y valores de pH mayores que 6, para el agua tipo I; y dosis de coagulante superiores a 50 mg/l, y valores de pH mayores que 5.5 para el agua tipo II. Se nota que esta región está claramente delimitada por los productos de aluminio,  $\text{Al}^{3+}$  y  $[\text{Al}(\text{OH})_4]$ , lo cual indica que debe haberse formado realmente el precipitado  $\text{Al}(\text{OH})_3(s)$ . Analizando también la Figura No. 2.6, se verifica que para el agua tipo I, la reestabilización ocurre para valores de pH inferiores a 7.5 y dosis de coagulante superiores a 25 mg/l, causando una disminución en la eficiencia de la remoción de la turbiedad a medida que el pH disminuye. La mayor eficiencia en la remoción de turbiedad, en la región de coagulación por barrido, se logra con dosis de sulfato de aluminio igual a 60 mg/l y pH de 6.55, para el agua tipo I. Para el agua tipo II, la mayor eficiencia en la remoción de color se presentó para una dosis de sulfato de aluminio igual a 140 mg/l y pH de 6.15.

Aunque los diagramas de las Figuras Nos. 2.4 y 2.5, hayan sido construidos con base en dos tipos de agua con características muy particulares, la coagulación con sulfato de aluminio para diversas aguas superficiales naturales, ha presentado un comportamiento semejante al mostrado en estas figuras, excepto cuando el color y la turbiedad son demasiado bajos, en cuyo caso se verifica únicamente la región de barrido, si el estudio se realiza utilizando coagulación, floculación y sedimentación. En este caso, se utilizó papel de filtro (Whatman 40), para estimar la dosis de sulfato de aluminio y el correspondiente pH, para filtración directa<sup>(35)</sup>.

También es conveniente indicar que las regiones de coagulación por adsorción para aguas tipo I y tipo II, se verificaron empleando papel de filtro (Whatman 40). Esta técnica permite obtener una idea rápida de estas regiones.

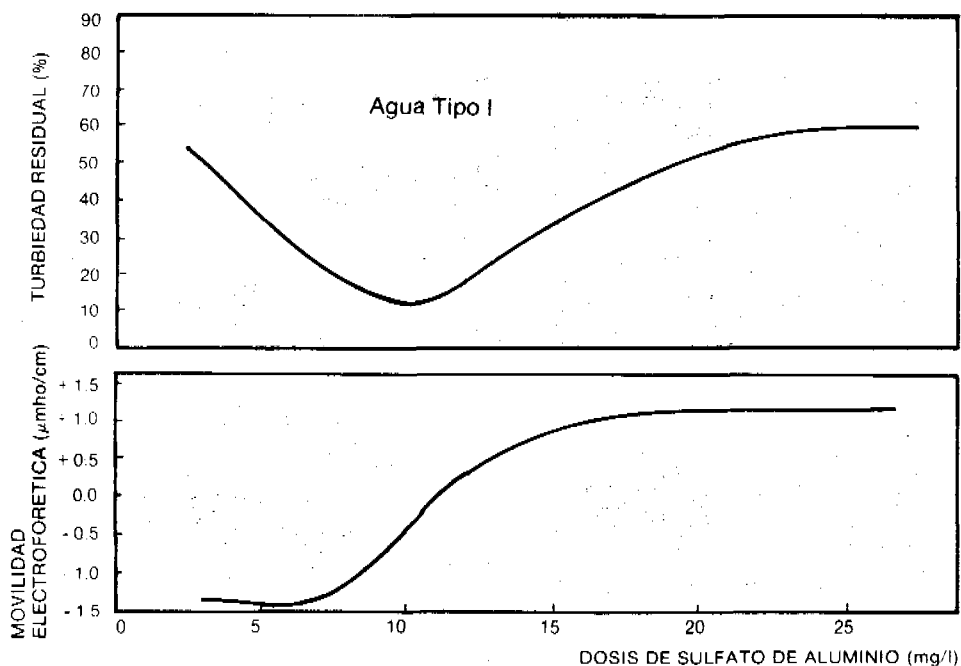


Fig. No. 2.7 Variación de la movilidad electroforética y turbiedad residual en función de la dosis de sulfato de aluminio para pH constante e igual a 4.65<sup>(32)</sup>

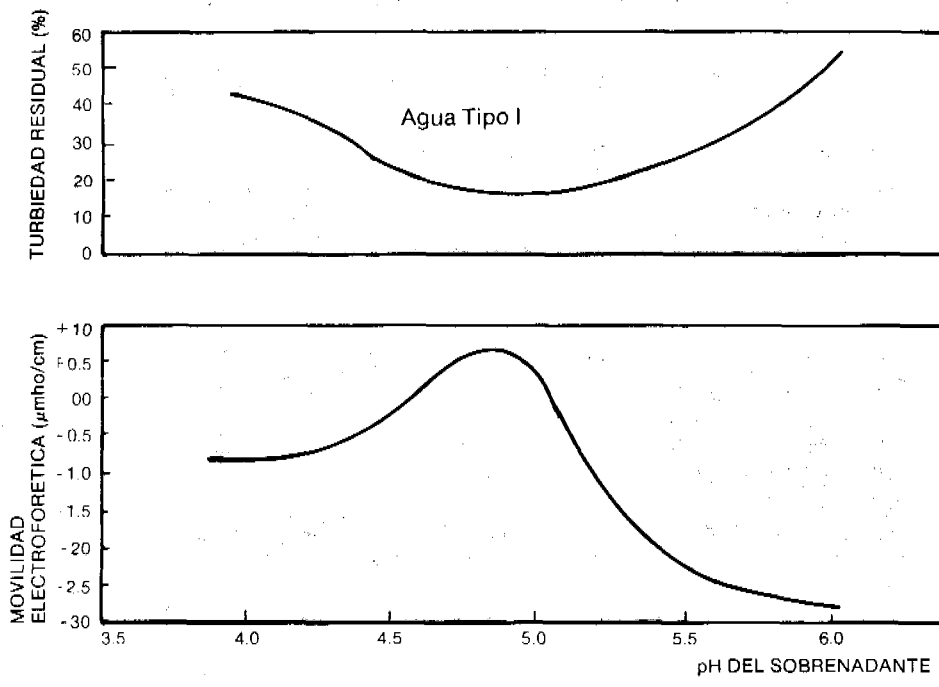


Fig. No. 2.8 Variación de la movilidad electroforética y turbiedad residual en función del pH para dosis de sulfato de aluminio constante e igual a 12 mg/l<sup>(32)</sup>.

# 3. Floculación

## 3.1 Introducción

Generalmente, en los estudios realizados en laboratorio, para la determinación de los parámetros de mezcla rápida, floculación y selección de velocidades de sedimentación, utilizando diferentes tipos de coagulantes primarios y auxiliares, no se han tenido en cuenta los mecanismos a través de los cuales la coagulación se efectúa en forma eficiente. Considerando que, en la mayoría de las plantas de tratamiento, el agua cruda proviene de manantiales superficiales, como ocurre en Brasil, resulta imperativo considerar la posibilidad de utilizar filtración directa descendente, ya que, durante muchos meses del año, se tienen afluentes con valores de turbiedad y color relativamente bajos. Así, en estas plantas de tratamiento, se podría considerar el paso directo de agua coagulada o prefloculada a los filtros, con una considerable economía de coagulante.

Como la coagulación es una etapa fundamental, independientemente del tipo de tratamiento y la calidad del agua cruda, es importante que, cuando se realicen ensayos de coagulación-floculación, sean investigadas, con profundidad, las condiciones bajo las cuales se obtiene la mejor eficiencia. Hasta hace poco tiempo se consideraba la metodología propuesta por Andreu-Villegas & Letterman<sup>(04)</sup> como la más completa para determinar los parámetros óptimos de mezcla rápida y floculación. Sin embargo, a partir de la propuesta de Amirtharajah & Mills<sup>(03)</sup>, de un diagrama donde se muestra la existencia de dos regiones bien diferenciadas, en las cuales la coagulación es realizada en forma eficiente, se hace necesario estudiar las condiciones óptimas de mezcla rápida y floculación, en las regiones mencionadas.

En este capítulo, se discutirán las características físicas de la mezcla rápida y la floculación, utilizando el sulfato de aluminio como coagulante primario, tomando como ejemplo estudios desarrollados en la EESC-USP, con muestras de agua tipo I y tipo II. Este capítulo también incluye algunas consideraciones generales sobre la floculación con polímeros.

## 3.2 Floculación con coagulante primario

### 3.2.1 Determinación de la dosis óptima de coagulante

Se considera como dosis óptima, aquella que, para cada mecanismo de coagulación, presenta un sobrenadante con los valores menores de turbiedad o color aparente residual después de la sedimentación. Cada vez que se indique una cierta dosis de coagulante, debe asociarse con el pH de coagulación. Como en la fase inicial del estudio no se dispone aún de los parámetros óptimos de mezcla rápida y floculación, es necesario efectuar algunos ensayos preliminares para fijar posteriormente el gradiente de velocidad (G) y el tiempo de agitación (T). En la mezcla rápida, se pueden utilizar por ejemplo, tres valores de G, entre 200 y 1000 s<sup>-1</sup> y tres de T entre 5 y 60 s. Para la floculación, también se pueden utilizar tres valores de G, entre 10 y 60 s<sup>-1</sup>, y tres de T, entre 10 y 90 minutos.

Variando la dosis de coagulante, con una concentración adoptada (1%, por ejemplo) y con velocidad de sedimentación de 1 cm/min, se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla No. 3.1) para las aguas tipo I y tipo II, cuyas características se presentaron en la Tabla No. 2.2.

Tabla No. 3.1 Parámetros obtenidos en los ensayos preliminares para las aguas tipo I y tipo II.

Proceso/ Operación	Gradiente de Velocidad (s <sup>-1</sup> )		Tiempo de Mezcla (s)	
	Tipo I	Tipo II	Tipo I	Tipo II
Mezcla rápida	900	900	5	5
Floculación	30	15	1200	1800

Una vez fijados los parámetros considerados inicialmente como los más adecuados para la mezcla rápida y la floculación, se estudian las dosis de coagulante y los respectivos valores de pH de coagulación y se determina la turbiedad o el color del sobrenadante, después de 10 minutos de sedimentación (velocidad de 1 cm/min). Las Figuras Nos. 2.4 y 2.5 del capítulo 2 presentan las regiones donde la coagulación es eficiente, destacando los mecanismos de adsorción y barrido. La Tabla No. 3.2 muestra las dosis óptimas de sulfato de aluminio y los valores de pH de coagulación correspondientes a cada región.

**Tabla No. 3.2 Dosis óptimas de sulfato de aluminio y valores de pH de coagulación.**

Descripción	Mecanismo de coagulación			
	Agua Tipo I		Agua Tipo II	
	Adsorción	Barrido	Adsorción	Barrido
Dosis de sulfato de aluminio (mg/l)	10	60	20	140
pH de coagulación	4.80	6.55	4.40	6.15

**3.2.2 Optimización de los parámetros de mezcla rápida**

Esta fase se realiza para los dos mecanismos de coagulación, utilizándose los datos de la Tabla No. 3.2 pero, conservando los parámetros de floculación (Tabla No. 3.1). Generalmente se deben evaluar valores de G entre 200 y 1500 s<sup>-1</sup> y de T entre 1 y 180 s. Por ejemplo, para las aguas Tipo I y Tipo II, se obtuvieron los parámetros indicados en la Tabla No. 3.3, con los cuales se logró un sobrenadante con valores de color aparente o turbiedad más bajos.

**Tabla No. 3.3 Parámetros y valores óptimos de mezcla rápida.**

Parámetro	Mecanismo de coagulación			
	Agua Tipo I		Agua Tipo II	
	Adsorción	Barrido	Adsorción	Barrido
Gradiente de velocidad (s <sup>-1</sup> )	500	500	500	900
Tiempo de mezcla (s)	2	5	5	5

**3.2.3 Optimización de los parámetros de floculación**

Para las condiciones óptimas de mezcla rápida, dosis de coagulante y los respectivos valores de pH, se estudia la floculación para cada mecanismo de coagulación, con G variando entre 4 y 200 s<sup>-1</sup> y T entre 2 y 120 min. Por ejemplo, para los dos tipos de agua en referencia, las Figuras Nos. 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 presentan los valores de las relaciones Tf/Ti y Cf/Ci (Tf: turbiedad residual; Ti: turbiedad inicial; Cf: Color residual; Ci: Color inicial) en función del tiempo de floculación y el gradiente de velocidad, obtenidos para el agua tipo I, con temperatura entre 18 y 20°C y para el agua tipo II, entre 21 y 23°C. Como se puede observar en estas figuras, el gradiente óptimo de velocidad (G\*), para cada periodo de floculación (T) estudiado, se obtiene en función de la turbiedad o el color aparente residual mínimo. Los valores de G\* se grafican en función de los periodos de floculación respectivos, como muestran las Figuras Nos. 3.5 y 3.6.

Según Andreu - Villegas & Letterman<sup>(104)</sup>, los datos de las Figuras Nos. 3.5 y 3.6 se ajustan a líneas rectas, de acuerdo con una ecuación de la siguiente forma:

$$2.8 \log G^* + \log T = \log K \tag{3.1}$$

donde:

G\* = Gradiente óptimo de velocidad (s<sup>-1</sup>)

T: Período de floculación (min)

K: Constante

De la ecuación (3.1), se obtiene:

$$(G^*)^{2.8} \cdot T = K \tag{3.2}$$

De acuerdo con la ecuación 3.2, el valor de G\* tiende a cero a medida que se aumenta el tiempo de floculación, lo cual no se verificó en el presente trabajo. Lo cierto es que, para los dos mecanismos de coagulación en las aguas Tipo I y Tipo II, el valor de G\* tiende a un valor mínimo (G'), lo cual puede ser constatado en las Figuras Nos. 3.7 y 3.8. Estas figuras se construyeron utilizando los datos experimentales, buscando maximizar el coeficiente de correlación. Es interesante observar que un resultado semejante había sido previsto por Argaman y Kaufman<sup>(108)</sup>, quienes verificaron que es necesario un gradiente mínimo de velocidad para que la floculación ortocinética sea efectiva.

En estas condiciones, se propuso una nueva ecuación, cuya forma general, es la siguiente:

$$(G^* - G') = K T^n \tag{3.3}$$

Con los valores de  $G'$  (Figuras Nos. 3.7 y 3.8), se construyeron las Figuras Nos. 3.9 y 3.10, para las cuales se tienen, en las ordenadas, los valores de  $(G' - G')$ . En este caso los coeficientes de correlación resultaron mucho mayores que los obtenidos en la ecuación propuesta por Villegas y Letterman, tal como se muestra en las Figuras Nos. 3.5 y 3.6

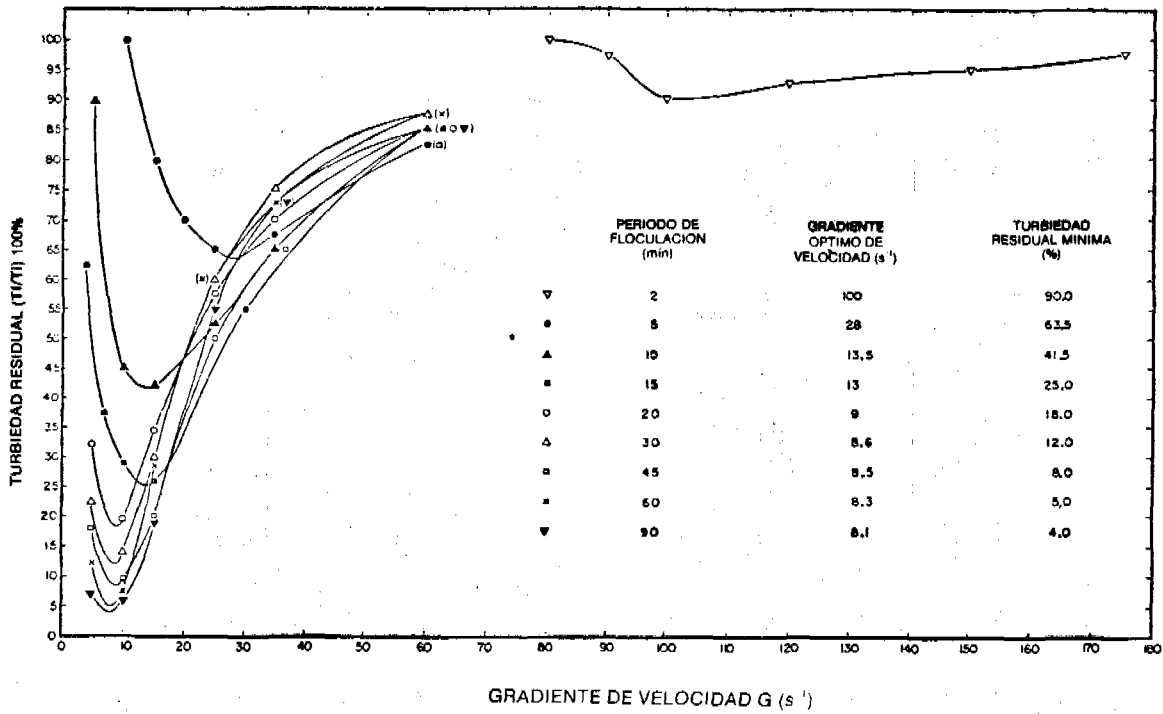


Fig. No. 3.1 Curvas de variación de la turbiedad residual en función del gradiente de velocidad para varios periodos de floculación; Agua Tipo I; mecanismo de coagulación: adsorción (dosis = 10 mg/l; pH = 4.8); periodo de sedimentación: 5 min. <sup>(32)</sup>

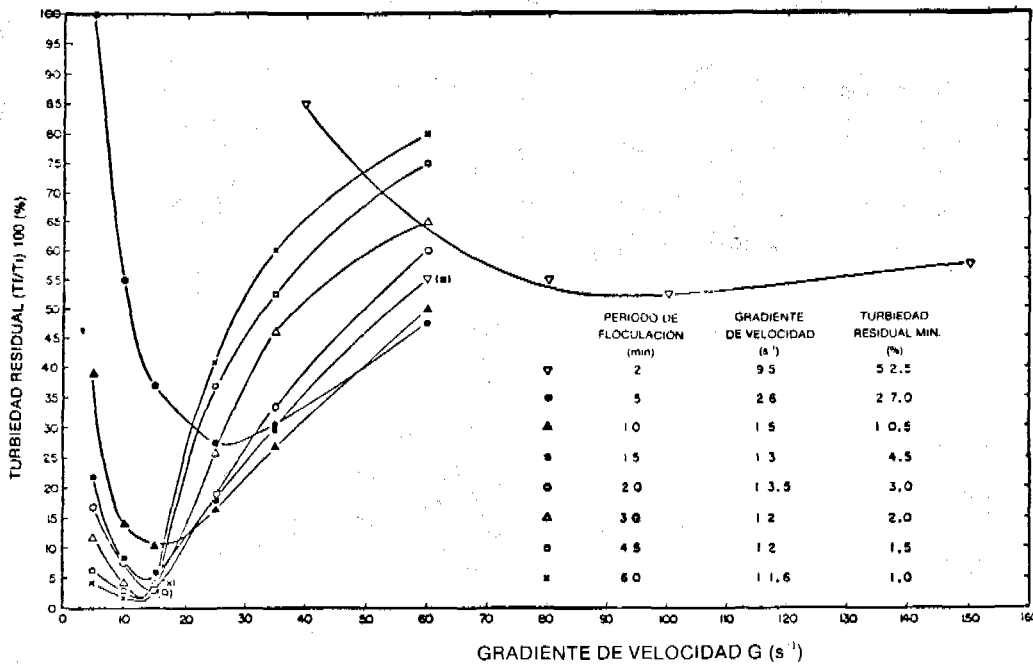


Fig. No. 3.2 Curvas de variación de la turbiedad residual en función del gradiente de velocidad para varios periodos de floculación; Agua Tipo I; mecanismo de coagulación: barrido (dosis = 60 mg/l; pH = 6.55); periodo de sedimentación: 5 min. <sup>(32)</sup>

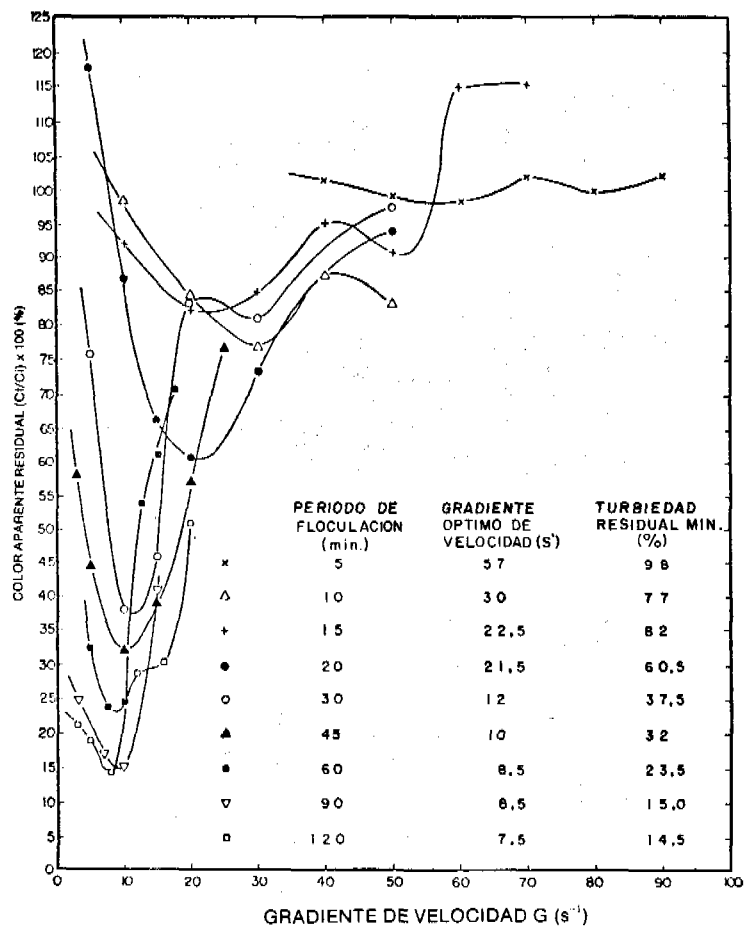


Fig. No. 3.3 Curvas de variación del color aparente residual en función del gradiente de velocidad para varios periodos de floculación; Agua Tipo II; mecanismo de coagulación: adsorción (dosis = 20 mg/l; pH = 4.40); periodo de sedimentación: 10 min<sup>(32)</sup>

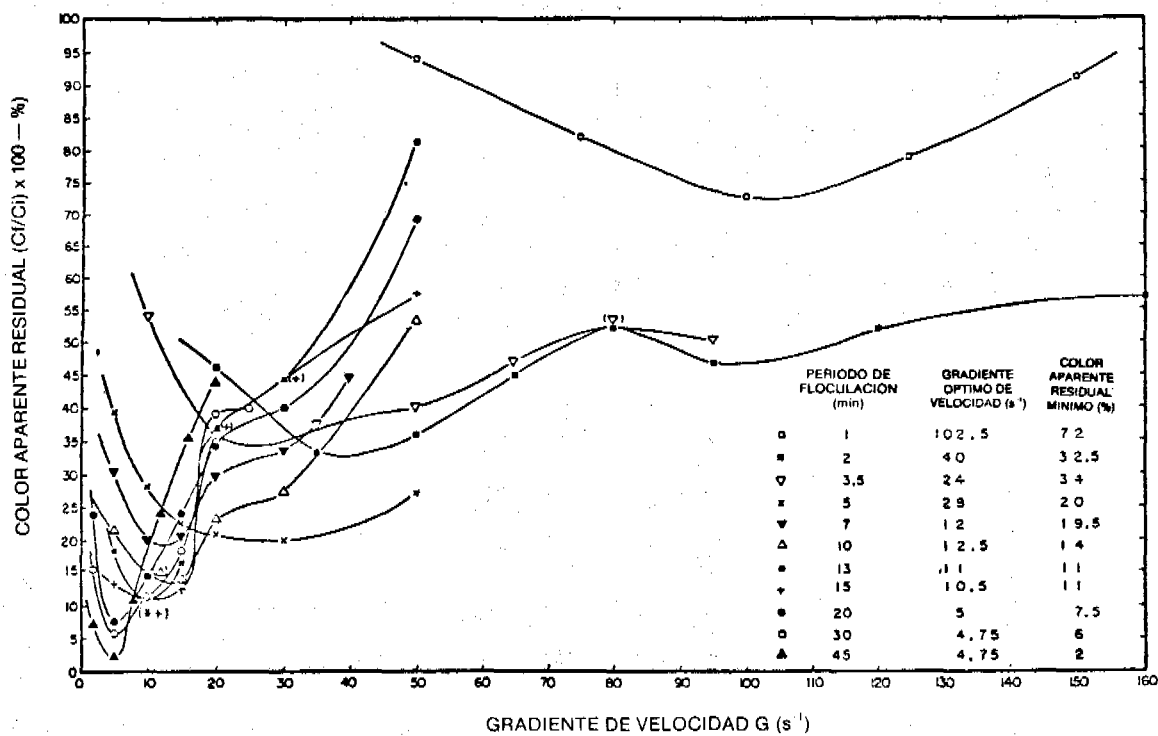


Fig. No. 3.4 Curvas de variación del color aparente residual en función del gradiente de velocidad para varios periodos de floculación; Agua Tipo II; mecanismo de coagulación: barrido (dosis 140 mg/l; pH = 6.15); periodo de sedimentación: 5 min<sup>(32)</sup>



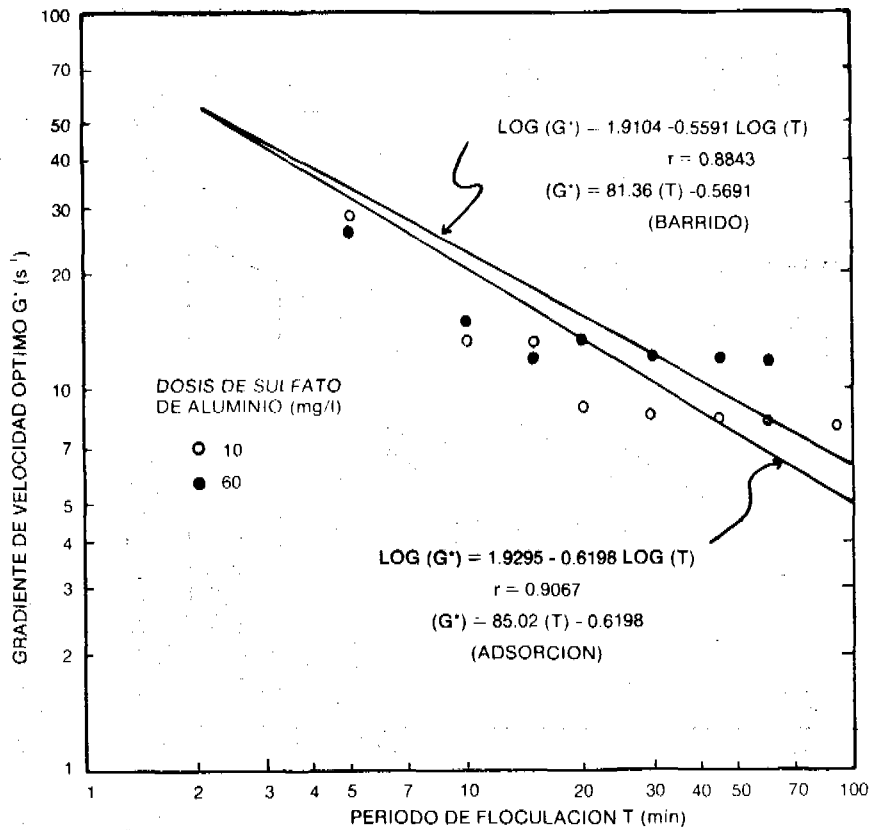


Fig. No. 3.5 Curvas de variación del gradiente óptimo de velocidad en función del período de floculación - Modelo de Andreu-Villegas & Letterman; Agua Tipo I; mecanismos de coagulación: adsorción y barrido. <sup>(32)</sup>

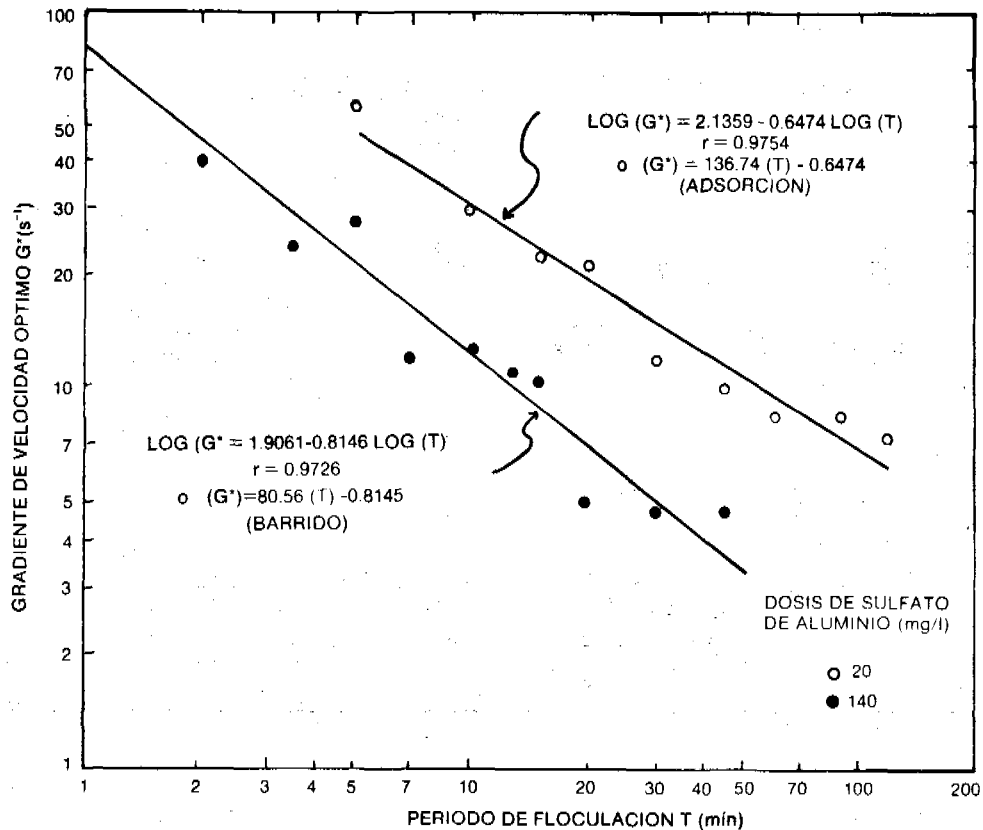


Fig. No. 3.6 Curvas de variación del gradiente óptimo de velocidad en función del período de floculación - Modelo de Andreu - Villegas & Letterman; Agua tipo II; mecanismos de coagulación: adsorción y barrido. <sup>(32)</sup>

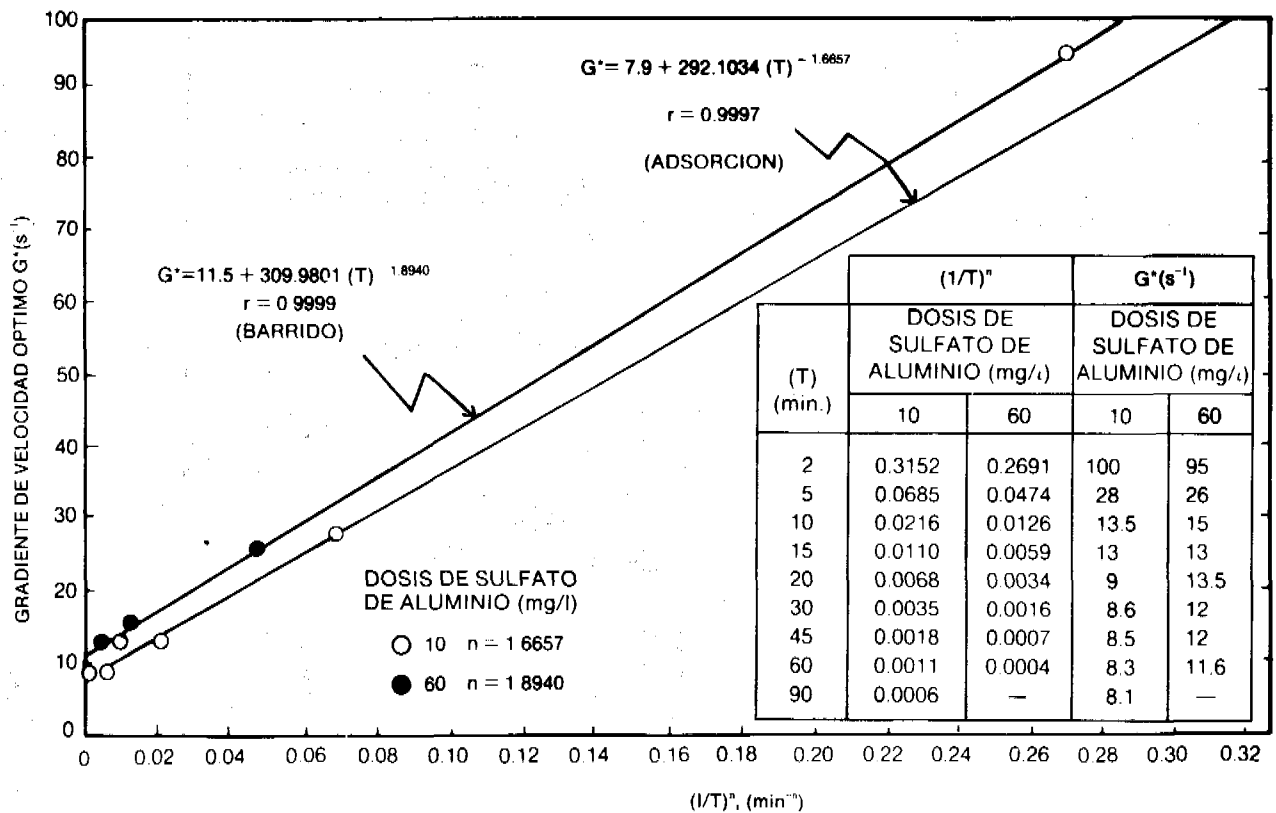


Fig. No. 3.7 Curvas de variación del gradiente óptimo de velocidad en función de  $(1/T)^n$  para el agua Tipo I; mecanismos de coagulación: adsorción y barrido <sup>(32)</sup>.

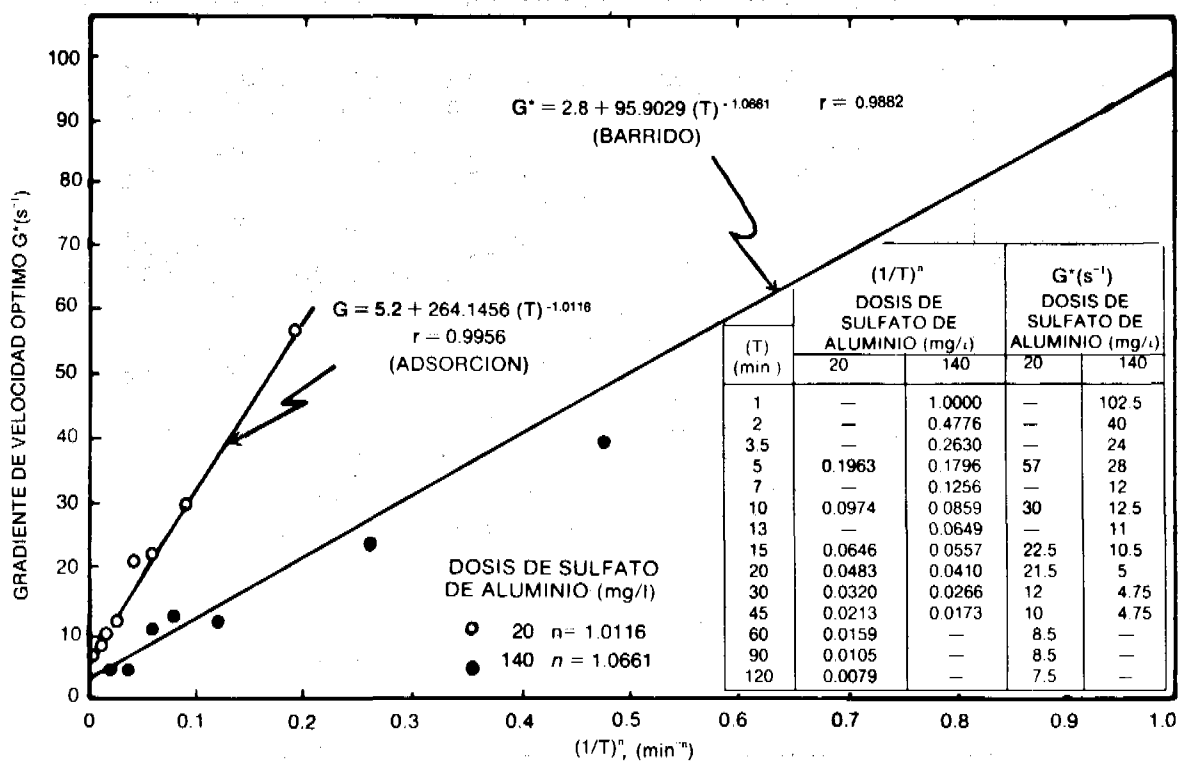
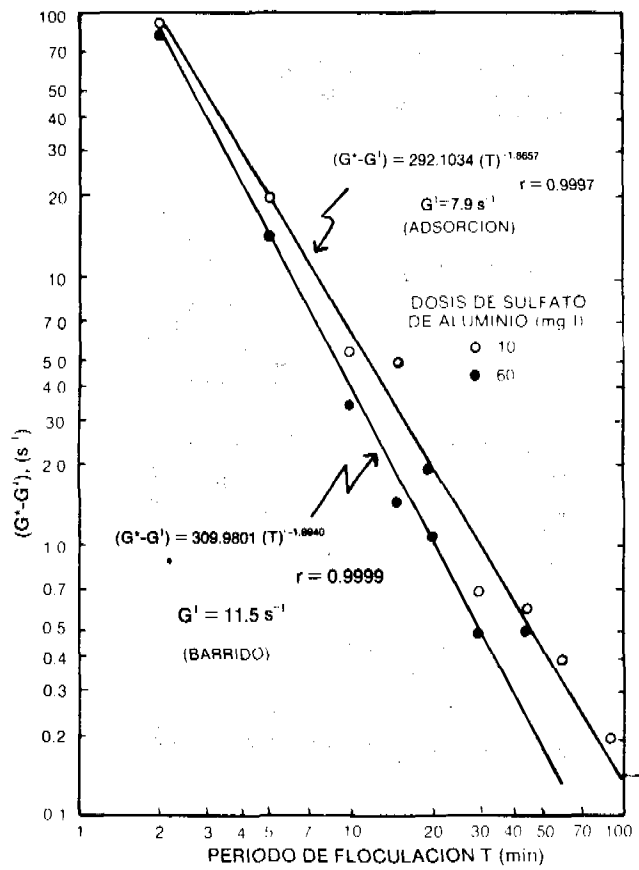
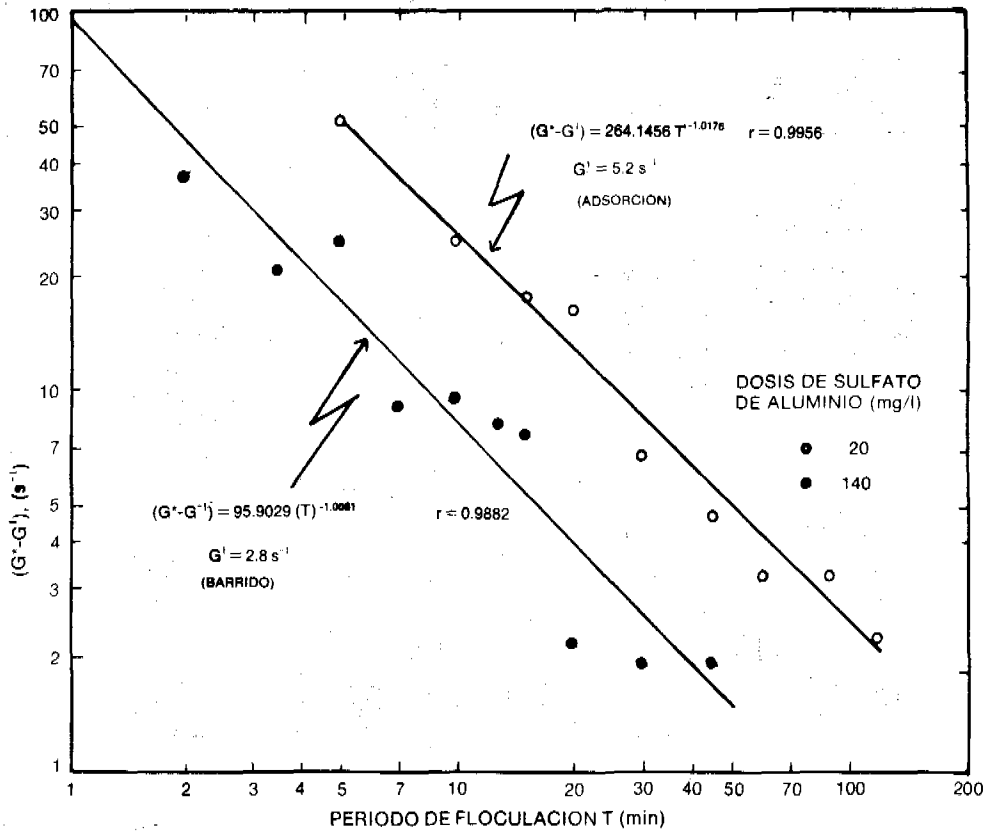


Fig. No. 3.8 Curvas de variación del gradiente óptimo de velocidad en función de  $(1/T)^n$  para aguas Tipo II; mecanismos de coagulación: adsorción y barrido <sup>(32)</sup>.



**Fig. No. 3.9**  
 Curvas de variación de  $(G^* - G')$  en función del periodo de floculación - Modelo propuesto - Agua Tipo I; mecanismos de coagulación: adsorción y barrido<sup>(32)</sup>.



**Fig. No. 3.10** Curvas de variación de  $(G^* - G')$  en función del periodo de floculación - Modelo propuesto - Agua Tipo II; mecanismos de coagulación: adsorción y barrido. <sup>(32)</sup>

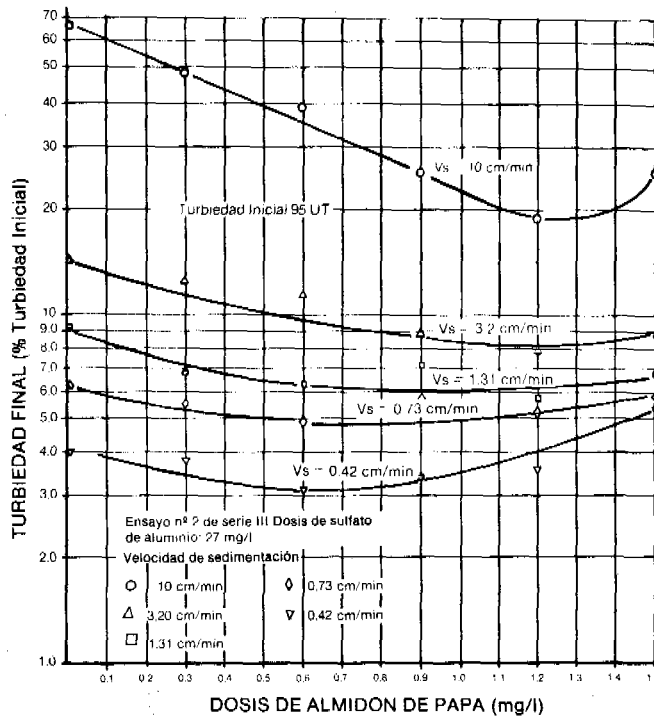


Fig. No. 4.21 - Eficiencia de remoción de la turbiedad en función de la dosis de almidón de papa.<sup>(37)</sup>

#### 4.2.3 Ensayos en plantas de tratamiento

##### 4.2.3.1 Introducción

Actualmente, varias plantas de tratamiento han venido probando la aplicación del almidón como auxiliar de floculación y, en algunas ciudades, esta técnica ha sido incorporada como una labor de rutina en el proceso de tratamiento del agua. Entre estas ciudades se pueden citar: Araraquara, S. P. (Brasil); São Carlos, S.P. (Brasil); Rondonópolis, Mato Grosso (Brasil) y Guayaquil (Ecuador).

La primera planta de tratamiento de agua que utilizó almidón como ayudante de floculación en el Brasil, fue la ciudad de São Carlos<sup>(23)</sup>; sus resultados serán presentados a continuación.

Antes de presentar los ensayos realizados en esta ciudad, se hará una breve descripción de la metodología que se debe seguir, cuando se quieran realizar experiencias en plantas de tratamiento, utilizando una solución de almidón como ayudante de floculación.

##### 4.2.3.2 Criterios para la preparación y aplicación del almidón en los periodos de ensayo<sup>(24)</sup>

a) Estimativo del consumo diario de almidón e hidróxido de sodio.

Generalmente, la dosis de almidón que produce resultados satisfactorios, varía entre 0.1 y 1.5 mg/l, de acuerdo con lo descrito anteriormente. Es así como, por ejemplo, en una planta de tratamiento de agua con una capacidad igual a 10.000 m<sup>3</sup>/día, el consumo estimado de almidón puede variar entre 1 y 15 kg/día. Si se considera el hidróxido de sodio (soda cáustica) para gelatinizar el almidón, la proporción, en peso, es del orden de 1:5 ó 1:4. De acuerdo con esta proporción, para el consumo de almidón anteriormente estimado, el consumo de soda cáustica puede variar entre 0.25 y 3.5 kg/día, aproximadamente. Es evidente que los valores aquí presentados son aproximados, debiéndose en cada caso, obtener las cantidades de almidón y de soda cáustica que permitan lograr resultados deseables, mediante una aplicación continua en la planta de tratamiento que se va a estudiar.

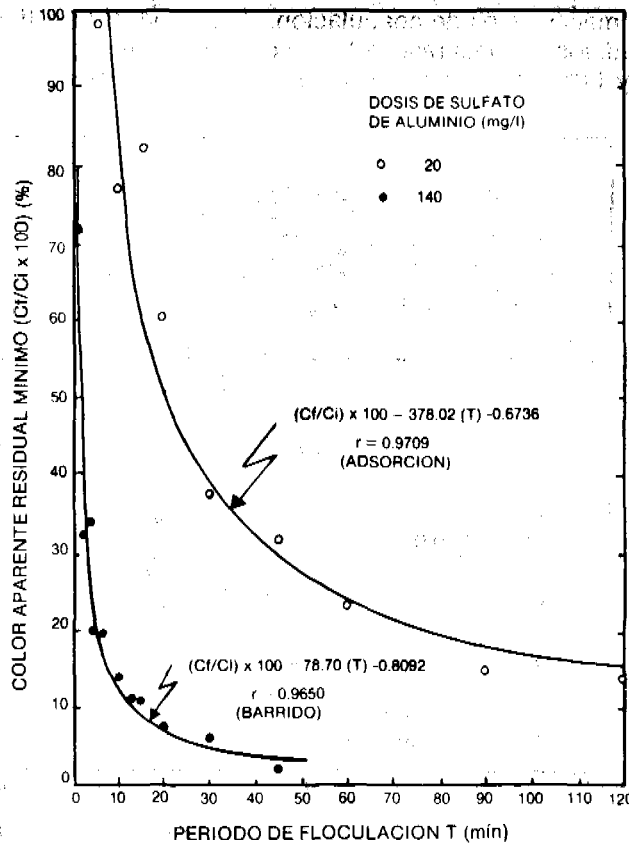
b) Concentración del almidón en los tanques de preparación.

Como unidad provisional (para una prueba preliminar) en la preparación y dosificación de la suspensión de almidón, se puede contar, por ejemplo, con dos tanques de 1 m<sup>3</sup>. En función de la capacidad de la planta, se puede estimar el tiempo de operación de cada tanque, tomando como base una concentración máxima del 1.5% (15 g de almidón por litro de suspensión). Si en algún caso es necesario el uso de una concentración superior al 1.5%, se deben efectuar pruebas específicas, con el fin de verificar si la viscosidad de la solución no resulta excesiva para el equipo de dosificación instalado.

En el ejemplo citado, para una planta de tratamiento con capacidad de 10.000 m<sup>3</sup>/día, se tendría:

- Consumo de almidón: 1 kg/día (mínimo)  
Volumen diario de solución: 66.7 litros, con una concentración del 1.5%
- Consumo de almidón: 15 kg/día (máximo)  
Volumen diario de solución: 1000 litros, con una concentración del 1.5%.

Fig. No. 3.12  
Curvas de variación del color aparente residual mínimo en función del período de floculación para el agua Tipo II; mecanismos de coagulación: adsorción y barrido.



### 3.2.4. - Efecto de la concentración del coagulante

El estudio del efecto de la concentración del coagulante en la coagulación-floculación, puede ser realizado a través del análisis de la velocidad de sedimentación de los flocúlos. Considerando el caso de las aguas Tipo I y Tipo II, la Tabla No. 3.6 muestra los parámetros obtenidos para una concentración del 1%, que se conservaron para las siguientes concentraciones: 0.05; 0.10; 0.25; 0.50; 0.75; 1.00; 2.00; 3.00; 5.00; 7.00 y 10.00%.

Tabla No. 3.6 - Parámetros de mezcla rápida, floculación y dosis de coagulante para los ensayos de verificación del efecto de la concentración del coagulante.

Descripción	Agua Tipo I		Agua Tipo II	
	Adsorción	Barrido	Adsorción	Barrido
Dosis de sulfato de aluminio (mg/l)	10	60	20	140
pH de coagulación	4.80	6.55	4.40	6.15
Mezcla rápida				
- G ( $s^{-1}$ )	500	500	500	900
- T (s)	5	2	5	5
Floculación				
- G* ( $s^{-1}$ )	8.9	12.6	8.8	5.4
- T (min)	30	20	30	70

Se tomaron muestras del sobrenadante en los reactores a los tiempos de 1, 3, 7, 12, 20 y 30 minutos, después del período de floculación. Las Figuras Nos. 3.13, 3.14, 3.15 y 3.16 presentan los resultados obtenidos. En estas figuras se tiene, en las ordenadas, el porcentaje de turbiedad o color aparente remanente, originado por aquellas partículas que sedimentan con velocidad menor o igual a la indicada en la figura y, en las abscisas, la concentración de la solución de sulfato de aluminio.

Para el agua Tipo I, que presenta turbiedad elevada en relación con el color, la concentración de coagulante parece no ejercer influencia significativa en la velocidad de sedimentación de los flocúlos

formados, para los dos mecanismos de coagulación. Para el agua Tipo II, con un color elevado en relación con la turbiedad, los mejores resultados se obtienen con una concentración de coagulante comprendida entre 0.5 y 1.0%, para los dos mecanismos de coagulación.

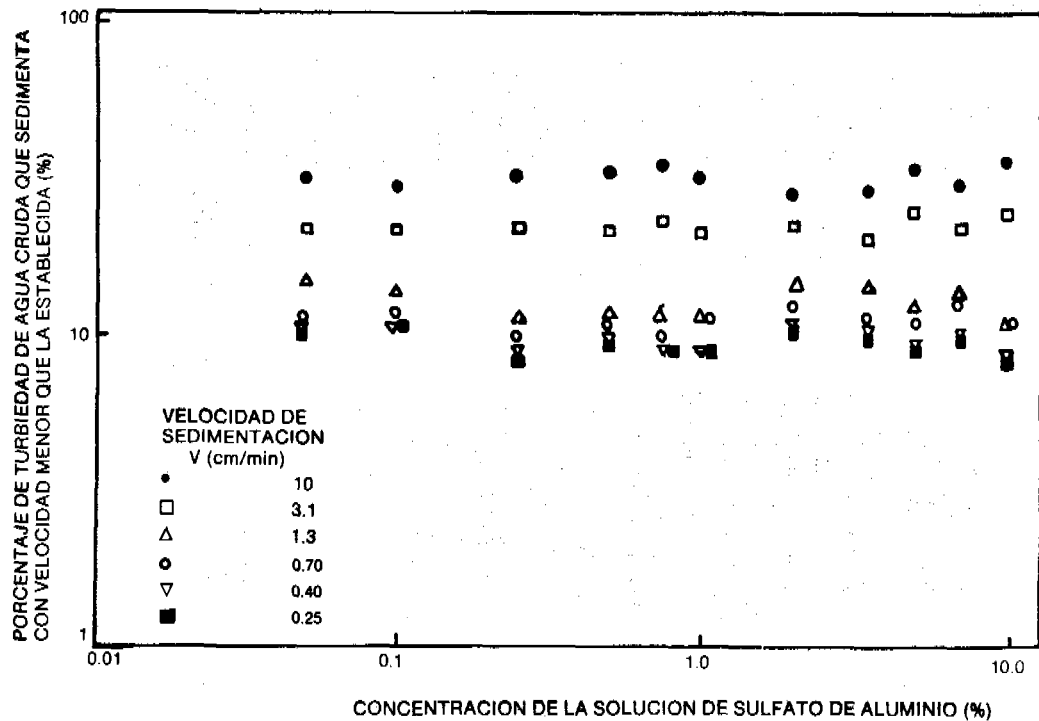


Fig. No. 3.13 Variación del porcentaje de turbiedad del agua preparada que sedimenta con velocidad menor que la establecida, en función de la concentración de la solución de sulfato de aluminio; Agua Tipo I; mecanismo de coagulación: adsorción (dosis = 10 mg/l; pH = 4.8) <sup>(32)</sup>.

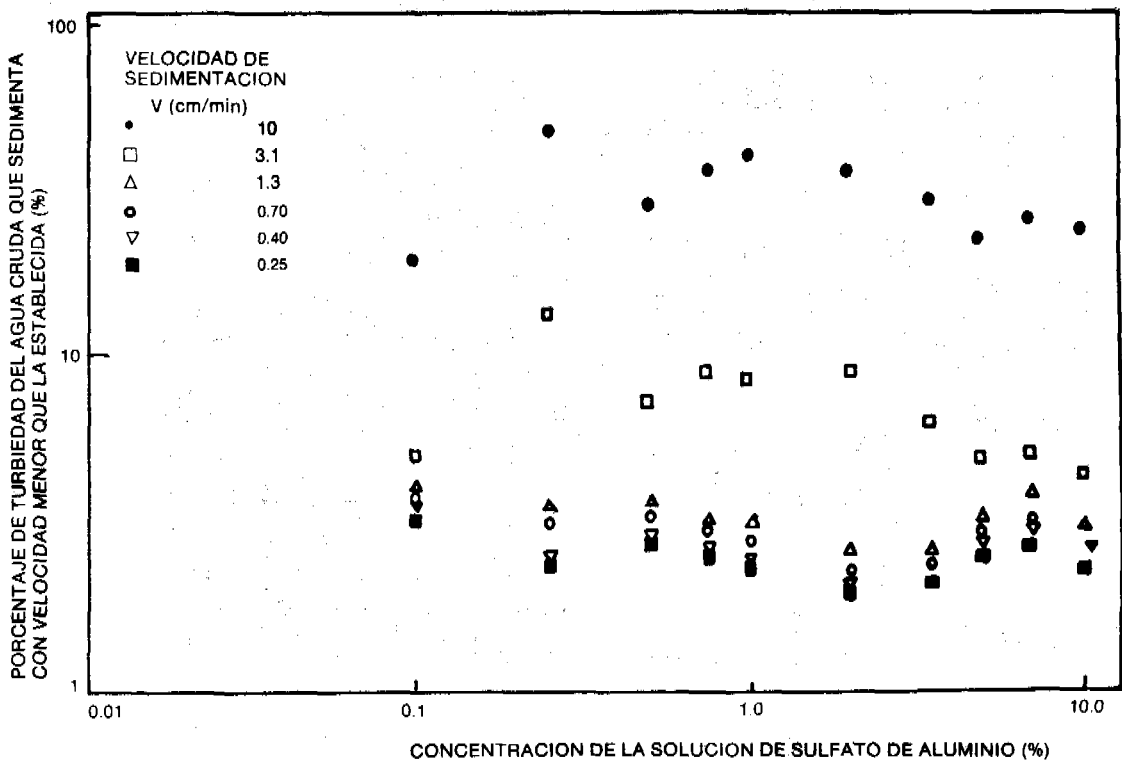


Fig. No. 3.14 Variación del porcentaje de turbiedad del agua preparada que sedimenta a velocidad menor que la establecida, en función de la concentración de la solución de sulfato de aluminio; Agua Tipo I; mecanismo de coagulación: barrido (dosis = 60 mg/l; pH = 6.55) <sup>(32)</sup>.

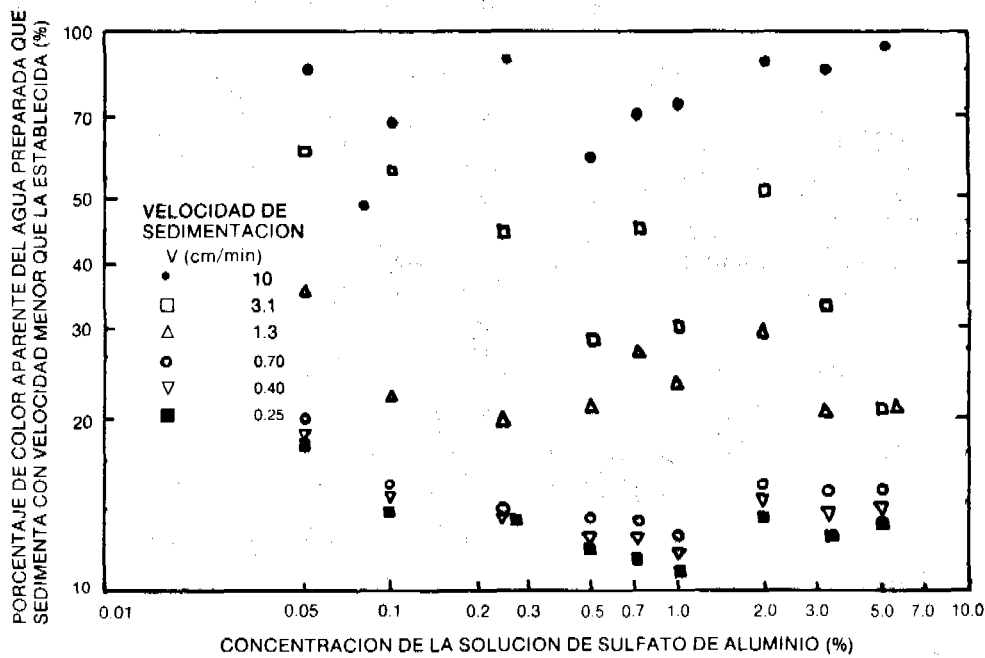


Fig. No. 3.15 Variación del porcentaje de color aparente del agua preparada que sedimenta con velocidad menor que la establecida, en función de la concentración de la solución de sulfato de aluminio; Agua Tipo II; mecanismo de coagulación: adsorción (dosis = 20 mg/l; pH = 4.4) <sup>(32)</sup>.

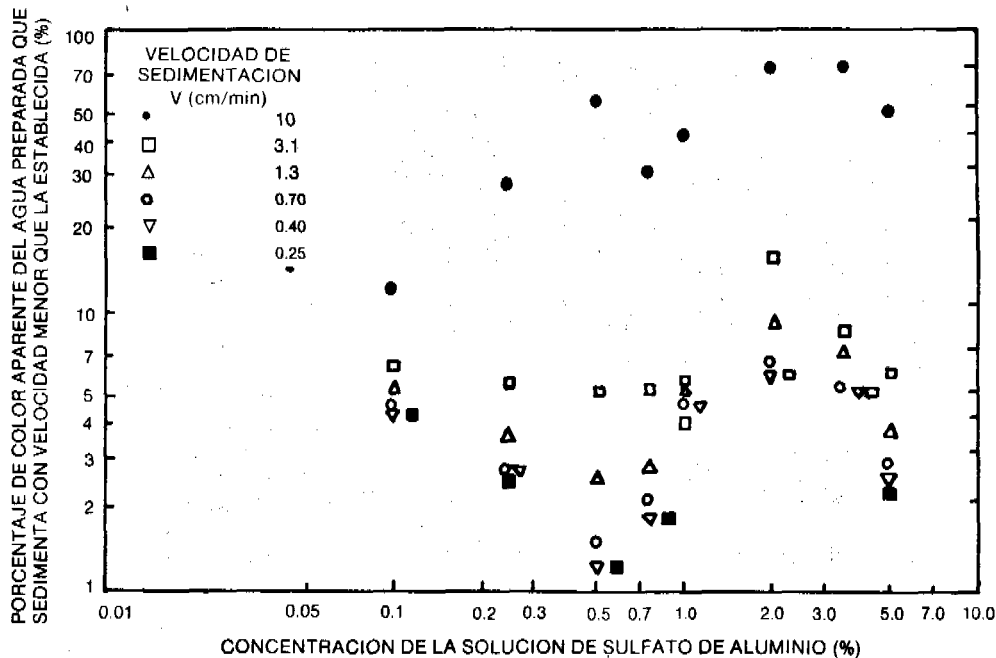


Fig. No. 3.16 Variación del porcentaje de color aparente del agua preparada que sedimenta con velocidad menor que la establecida, en función de la concentración de la solución de sulfato de aluminio; Agua Tipo II; mecanismo de coagulación: barrido (dosis = 140 mg/l; pH = 6.25) <sup>(32)</sup>.

### 3.2.5. - Utilización de los parámetros obtenidos en el laboratorio

Hace algún tiempo se desarrollaron varios modelos matemáticos, procurando relacionar la eficiencia en la remoción de partículas primarias de una suspensión, en función del tiempo de floculación y el gradiente de velocidad. Estos diagramas fueron desarrollados, principalmente, por Argaman & Kaufman <sup>(09)</sup> y Harris <sup>(45)</sup>. A continuación, se presentan algunos modelos matemáticos en función del tipo de reactor utilizado.

a - Reactor estático o de flujo a pistón

La ecuación en forma integrada que relaciona los parámetros de floculación para un reactor estático es:

$$\frac{N_t}{N_0} = \frac{K_B}{K_A} \cdot G + \left[ 1 - \left( \frac{K_B}{K_A} \right) G \right] e^{-K_A G T} \quad (3.12)$$

donde

$N_t$  : número de partículas primarias al tiempo  $t$

$N_0$  : número inicial de partículas primarias

$G$  : gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ )

$T$  : tiempo de floculación (s)

$K_A$  : constante de agregación

$K_B$  : constante de ruptura

Tomando la primera derivada parcial de la ecuación 3.12 con respecto a  $G$  e igualada a cero, se tiene:

$$K_B = \frac{K_A e^{-K_A G^* T_d} (K_A T_d^{-1})}{(1 + K_A T G^* e^{-K_A T G^*}) - (e^{-K_A T G^*})} \quad (3.13)$$

El valor de  $K_A$  y  $K_B$  puede ser determinado a partir de estudios de laboratorio, para un determinado tiempo de floculación, considerado como satisfactorio. Utilizando los tiempos de floculación de la Tabla No. 3.6, en las ecuaciones 3.8, 3.9, 3.10 y 3.11, se obtienen los valores presentados en la Tabla No. 3.7, en la cual se incluyen también los valores de  $G^*$  y  $T$ , para las aguas Tipo I y Tipo II.

**Tabla No. 3.7 - Valores de eficiencia en la remoción de turbiedad o color y gradiente óptimo de velocidad ( $G^*$ )**

Agua	Mecanismo de coagulación					
	Adsorción			Barrido		
	$(T_i/T_j)$ ó $(C_i/C_j)$ (%)	$G^*$ ( $s^{-1}$ )	$T$ (s)	$(T_i/T_j)$ ó $(C_i/C_j)$ (%)	$G^*$ ( $s^{-1}$ )	$T$ (s)
Tipo I	11.61	8.9	1800	3.67	12.6	1200
Tipo II	38.24	8.8	1800	2.53	5.4	4200

Con los valores de la Tabla No. 3.7 y las ecuaciones 3.12 y 3.13, se determinaron las constantes  $K_A$  y  $K_B$ , presentadas en la Tabla No. 3.8

**Tabla No. 3.8 - Valores de las Constantes  $K_A$  y  $K_B$**

Agua	Mecanismo de coagulación			
	Adsorción		Barrido	
	$K_A$	$K_B$ (s)	$K_A$	$K_B$ (s)
Tipo I	$2.25 \times 10^{-4}$	$2.315 \times 10^{-6}$	$3.38 \times 10^{-4}$	$8.07 \times 10^{-7}$
Tipo II	$1.15 \times 10^{-4}$	$3.39 \times 10^{-6}$	$2.43 \times 10^{-4}$	$9.84 \times 10^{-7}$

b) Reactor de mezcla completa

Para reactores de mezcla completa en serie, se puede usar la siguiente ecuación <sup>(08)</sup>:

$$N_i^0 = \frac{\left( 1 + K_A G \frac{T}{m} \right)^m}{1 + K_B G^2 \frac{T}{m} \left( \sum_{i=0}^{m-1} \left( 1 + K_A G \frac{T}{m} \right)^i \right)} \quad (3.14)$$



donde:

$N_i^0$ : número inicial de partículas primarias.

$N_i^m$ : número de partículas primarias en el afluente del reactor (m-1)

m : número de reactores en serie

T : tiempo de floculación (s)

Cuando se tiene un solo reactor ( $m = 1$ ), la ecuación 3.14 se transforma en:

$$\frac{N_i^0}{N_i^1} = \frac{1 + K_A G T}{1 + K_B G^2 T} \quad (3.15)$$

La Figura No. 3.17 muestra el efecto de la compartimentalización de la unidad de floculación en la eficiencia de la remoción de partículas primarias. Las curvas presentadas para uno y cuatro reactores, se trazaron de acuerdo con la ecuación 3.14, con  $K_A = 5,1 \times 10^{-5}$  y  $K_B = 1,1 \times 10^{-7}$  s. Si se observa la Figura N° 3.17, se nota que:

- (i) Para una cierta eficiencia, existe un tiempo mínimo de floculación, por debajo del cual, esta eficiencia no se obtiene, independientemente del valor de G.
- (ii) Para un cierto tiempo de floculación, existe un valor óptimo de G, por encima del cual la ruptura prima sobre la agregación.
- (iii) Para una cierta eficiencia, el tiempo total de floculación requerido es menor cuando la unidad de floculación se compartimentaliza. <sup>(08)</sup>

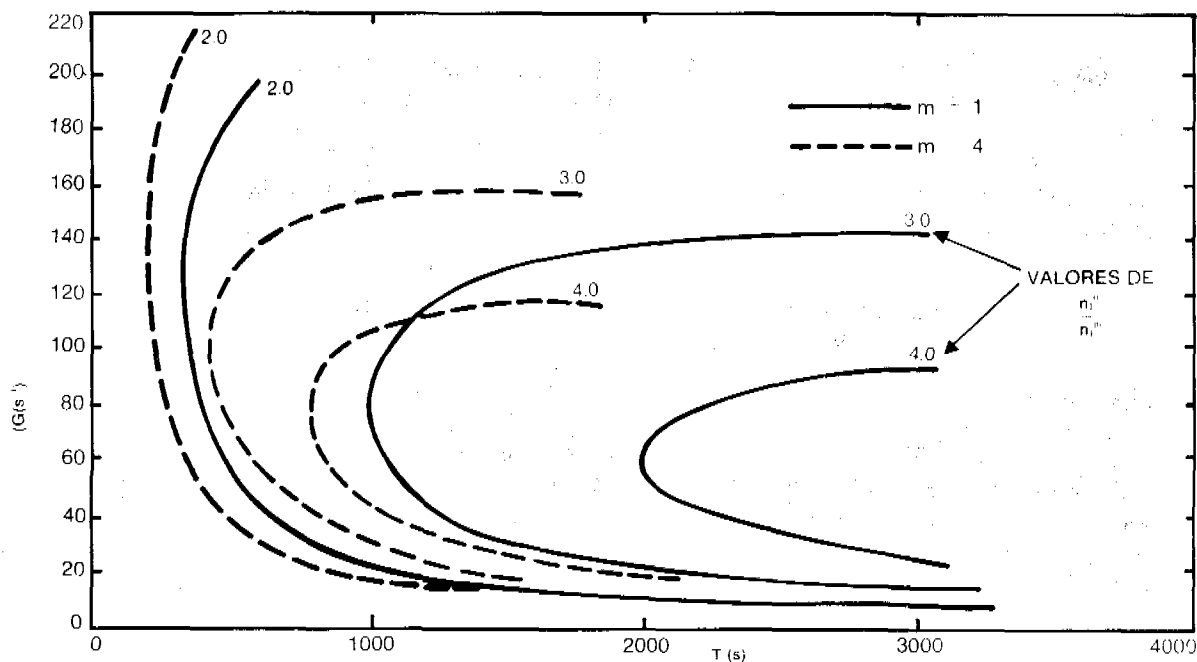


Fig. No. 3.17 Correlación entre eficiencia de floculación, número de cámaras (m) y los parámetros G y Td (Argaman & Kaufman <sup>(08)</sup>)

La aplicación de las ecuaciones 3.14 y 3.15, a partir de los datos obtenidos en el laboratorio, se muestra a continuación, con un ejemplo. En este caso se desea determinar la eficiencia de remoción en la unidad de floculación con uno y tres reactores en serie, para agua coagulada a través del mecanismo de barrido.

Agua Tipo I:

$$T = 1200 \text{ s}; G = 12.6 \text{ s}^{-1}; K_A = 3.38 \times 10^{-4}; K_B = 8.07 \times 10^{-7} \text{ s.}$$

$$\frac{T_i}{T_f} = 5.3 \quad (81.1\%), \text{ para un reactor}$$

$$\frac{T_i}{T_f} = 12.3 \quad (91.9\%), \text{ para tres reactores}$$

productos, considerados técnicamente como apropiados, se deben realizar comparaciones de costos y análisis sobre su seguridad sanitaria.

La lista de todos los productos aprobados por la Environmental Protection Agency, E.P.A., hasta 1972, así como las dosis máximas permitidas para su utilización en el tratamiento de aguas para abastecimiento público, se pueden encontrar en la bibliografía del presente trabajo, en el aparte clasificado como referencia (02).

La eficiencia de un polímero en la coagulación y/o floculación o filtración, depende de su estructura química, las propiedades del medio y las características de las sustancias o partículas a ser coaguladas y/o floculadas.

La floculación con polímeros presenta características distintas a las encontradas cuando se usa un electrolito de cadena pequeña.

Los modelos basados únicamente en las fuerzas electrostáticas son insuficientes para explicar la floculación con polímeros, pues existen muchos otros factores físicos y químicos que tienen importancia significativa en el fenómeno. Considerando, por ejemplo, que es posible el uso de polímeros aniónicos para flocular coloides cargados negativamente, es evidente que existen situaciones en las que ocurren otros fenómenos que superan la repulsión electrostática.

Actualmente, la mejor explicación para los mecanismos a través de los cuales los polielectrolitos desestabilizan los coloides, está basada en la adsorción del polímero a la superficie de las partículas coloidales, seguida o por la reducción de la carga o por el "entrelazamiento" de las partículas con los polielectrolitos. No es fácil estudiar separadamente estos dos mecanismos que ocurren en la agregación de las partículas; lo cierto es que están involucrados en forma conjunta, factores físicos y químicos. La atracción del polímero en la superficie coloidal puede ser predominantemente una propiedad química o simplemente una propiedad física<sup>(12)</sup>.

La Figura No. 3.19 presenta algunos esquemas de adsorción y la posterior interacción entre las moléculas de los polímeros y las partículas coloidales.

Los esquemas 3 y 4 (Figura No. 3.19) muestran dos situaciones en que las partículas coloidales permanecen estables, en detrimento de la formación de flóculos. La agitación excesiva puede ocasionar la ruptura de flóculos ya formados y provocar nuevamente la aparición de partículas estables, semejantes a las obtenidas a través del esquema 3.

En el esquema 4 (Figura No. 3.19) el polímero actúa como un agente de "protección", pues sus cadenas se extienden de manera apreciable hacia el interior del medio, dificultando la agregación de las partículas coloidales. Este efecto es denominado "estabilización estérica".

En 1958, Smellie & LaMer<sup>(87)</sup> presentaron un modelo muy interesante, que puede ser utilizado para explicar algunos factores relacionados con la floculación con polielectrolitos.

Con base en la hipótesis de que la adsorción de los polímeros en la superficie de las partículas coloidales, obedece a la isoterma de Langmuir, estos investigadores obtuvieron la siguiente expresión:

$$\theta (1+\theta) = \frac{\left[ \frac{1 + bkw}{b} \right] P_0}{\left[ \frac{1 + bkw}{b} + \frac{P_0}{1+bkw} \right]^2} \quad (3.16)$$

donde

$\theta$  : fracción de superficie de las partículas cubiertas por el adsorbato.

$b$  : constante

$k$  : constante que depende del área específica de los sólidos en suspensión

$w$  : concentración de sólidos en suspensión (mg/l)

$P_0$ : concentración inicial del polímero (mg/l)

Con base en los datos experimentales, LaMer afirma que las mejores condiciones de floculación ocurren cuando  $\theta = 0.50$ , o cuando  $\theta (1 - \theta) = 0.25$ . Esto significa que la condición óptima para la floculación con polímeros, ocurre cuando la mitad de la superficie de las partículas en suspensión está cubierta por los polímeros adsorbidos. El valor de  $\theta$  varía entre cero y uno. Analizando los valores extremos, se observa que, teóricamente, cuando un polímero no es adsorbido en la superficie,  $\theta = 0$  y  $\theta (1 - \theta) = 0$ , no ocurre floculación, y cuando toda la superficie está cubierta con polímero,  $\theta = 1$  y  $\theta (1 - \theta) = 0$ , tampoco ocurre. LaMer, consideró que el factor  $\theta (1 - \theta)$ , representa la "medida de sensibilización para el polielectrolito".

Healy & LaMer<sup>(47)</sup> presentaron en 1962, otro enfoque del fenómeno de la adsorción de polímeros, con base en el factor  $\theta$ ; ellos incluyeron además, el número de moléculas del polímero y el número de segmentos de cada molécula ( $B$ ) que son adsorbidos, cubriendo determinadas regiones de la superficie. Seguidamente, se presenta la ecuación que permite la evaluación de  $\theta$ :

$$\theta = \frac{B (P_0 - P) N}{s S_0} \quad (3.17)$$

donde:

$B$  : número de segmentos de cada molécula de polímero que son adsorbidos

$P_0$  : concentración de polímero adicionado (mg/l)

$P$  : concentración residual de polímero (mg/l)

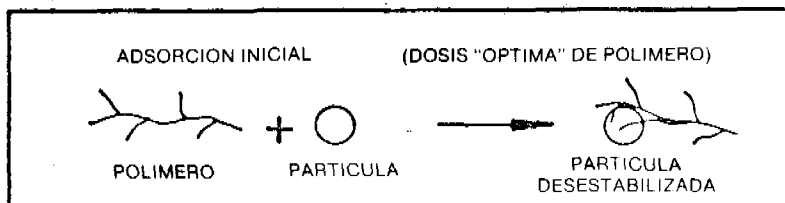
$N$  : número de Avogadro

$s$  : número de sitios por unidad de área en la superficie de las partículas en suspensión

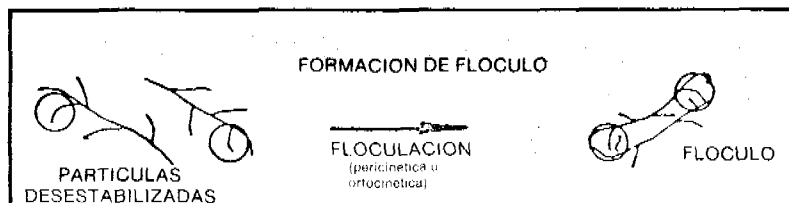
$S_0$  : área superficial total de las partículas en suspensión

La ecuación 3.17 puede ser expresada mediante las ecuaciones 3.18 y 3.19, permitiendo una mejor visión analítica del fenómeno.

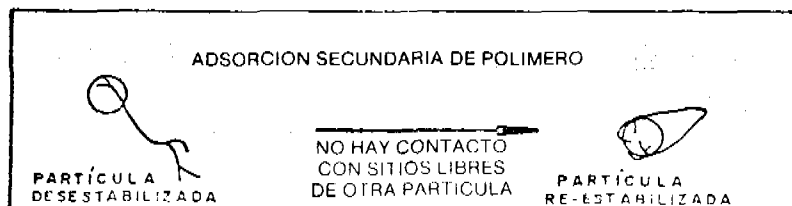
#### ESQUEMA 1



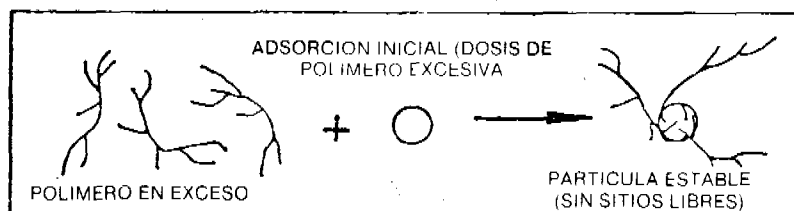
#### ESQUEMA 2



#### ESQUEMA 3



#### ESQUEMA 4



$$P = P_o - \frac{K\theta}{B} \quad (3.18)$$

$$K = \frac{sS_o}{N} \quad (3.19)$$

Estas ecuaciones no consideran la agitación del líquido que contiene las partículas en suspensión. La primera expresión matemática del fenómeno de colisión de partículas en condiciones de flujo laminar, se debe a Smoluchowski<sup>(85)</sup>.

Los factores involucrados en la floculación han venido siendo estudiados por muchos autores y, recientemente, se desarrollaron importantes estudios por Argaman & Kaufman<sup>(88)</sup>, que presentan un avance significativo en el conocimiento de los factores que tienen un papel importante en estos fenómenos.

Estos investigadores plantearon una ecuación simplificada (3.20) para describir la remoción de partículas primarias de una suspensión de caolinita, empleando sulfato de aluminio:

$$\frac{dN_f}{dt} = -K_A G N_f + K_B G^2 N_i \quad (3.20)$$

donde:

$N_i$ : número inicial de partículas primarias presentes en el reactor

$N_f$ : número de partículas primarias que salen del reactor

$K_A$ : constante de agregación

$K_B$ : constante de ruptura de los flóculos (s)

$G$ : gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ )

La integración de la ecuación 3.20, para un reactor estático o para un reactor tubular, da origen a la siguiente expresión:

$$\frac{N_f}{N_i} = \frac{K_B}{K_A} G T_d + \left[ 1 - \frac{K_B}{K_A} G T_d \right] e^{-K_A G T_d} \quad (3.21)$$

$T_d$ : tiempo de retención (s).

Hespanhol & Selleck<sup>(49)</sup>, con base en los estudios de Argaman & Kaufman, obtuvieron nuevas ecuaciones con el objetivo de mejorar la estimación de la eficiencia del proceso, cuando se utilizan polímeros. Estas ecuaciones se presentan a continuación:

$$\frac{N_f}{N_i} = 1 - e^{-K_c G} + e^{-K_c G T_d} e^{K_c G T_d} \quad (3.22)$$

$$K_c = \frac{K_B}{K_A} \quad (3.23)$$

La ecuación 3.22 muestra en forma explícita la influencia de algunos parámetros en la floculación; sin embargo, existe una serie muy grande de factores que ejercen un papel importante en el fenómeno. Entre estos factores, se destacan los siguientes:

#### **Concentración de polímero:**

Los estudios de Smellie & LaMer<sup>(87)</sup> demostraron que existe una concentración óptima de polímero, para la cual se obtiene la máxima eficiencia en la floculación. Esta concentración está asociada a la porción de superficie ( $\theta$ ) de las partículas en suspensión cubierta por las moléculas adsorbidas de polímeros.

#### **Masa molecular del polímero:**

Heller & Pugh<sup>(48)</sup> verificaron que ocurre una gran reducción en la eficiencia de la floculación cuando la masa molecular del polímero presenta valores superiores a 3.000.000. Estos investigadores atribuyen este hecho a la ocurrencia de la "estabilización estérica", resultante de la gran dificultad de aproximación de las partículas, debida a los grandes segmentos que se encuentran adsorbidos solamente en una pequeña porción, en una partícula, impidiendo la aproximación de las otras.

Para valores inferiores a este límite, se observa la reducción de la dosis necesaria de polímero, cuando se emplean productos de mayor masa molecular, pues un aumento en este parámetro molecular tiende a incrementar el área cubierta por los segmentos.

#### **Agitación:**

El efecto de agitación fue analizado de manera brillante en el trabajo ya citado de Argaman &

Kaufman<sup>(68)</sup>. La ecuación 3.20 permite observar, por lo menos indirectamente, a través del parámetro  $G$ , la influencia de la energía disipada en el reactor y la eficiencia de la floculación.

Para cada muestra de agua y para cada polímero, existe un gradiente de velocidad para el cual se dan los mejores resultados de floculación.

Los valores elevados de gradiente de velocidad están asociados a valores elevados de fuerzas de cizallamiento, que a su vez provocan la ruptura de los flóculos. Se sabe que la refloculación ocurre fácilmente cuando los productos adicionados son las sales de hierro o aluminio, comúnmente empleadas; pero, cuando se trata de polímeros, la refloculación ocurre con menor intensidad.

La agitación durante un tiempo muy prolongado, también puede ser perjudicial, porque permite que los segmentos de polímeros se reaproximen a la superficie de las partículas inicialmente adsorbidas, dificultando la adsorción de otras partículas, ocasionando eventualmente la desintegración del flóculo.

#### **Concentración y superficie específica de los sólidos:**

La ecuación 3.16 muestra la influencia del área superficial de las partículas en suspensión en el factor  $\theta$ . Como se indicó anteriormente, este factor es muy importante en la determinación de la eficiencia de la floculación y el consumo de polímeros. Por esta razón, cuanto mayores sean la superficie específica y la concentración de sólidos, en peso, mayor será la dosis necesaria de polímero.

#### **Concentración de hidrogeniones (pH):**

En general, el potencial zeta, al igual que otras propiedades de las partículas en suspensión, está íntimamente asociado con el pH. Además, los productos utilizados en la floculación pueden sufrir alteraciones sensibles en su comportamiento ante variaciones de pH.

Generalmente, cuanto más fuerte es la característica catiónica de un polielectrolito, menor será su sensibilidad a las variaciones de pH. Por otro lado, la sensibilidad al cambio de pH es más acentuada cuando son más fuertes las características aniónicas del polímero<sup>(49)</sup>.

#### **Hidrólisis del polímero:**

Es evidente que la hidrólisis es un factor muy importante en el comportamiento de un polímero, cuando se utiliza como auxiliar de floculación. Tanto el número de regiones ionizables, como su localización a lo largo de la molécula, interfieren de manera acentuada en la naturaleza de la adsorción a las partículas en suspensión.

Naturalmente, la hidrólisis de un polímero está también asociada al pH de la suspensión.

#### **Grupos funcionales de los polímeros:**

En la floculación con polímeros, las fuerzas electrostáticas, en ciertos casos, pueden tener un papel secundario, en comparación con el papel desempeñado por otros fenómenos físicos y químicos.

La presencia de determinados grupos funcionales puede caracterizar los fenómenos dominantes en la adsorción de un polímero en la superficie de una partícula en suspensión.

Por ejemplo, Michaels & Morelos<sup>(73)</sup> afirman que los polielectrolitos aniónicos son efectivos en la floculación de partículas que también presentan cargas negativas, solamente cuando estos polímeros también posean grupos polares (p.e.: Hidroxilo - OH).

La adsorción de polímeros no iónicos, ha sido justificada en ciertos casos por la formación de puentes de hidrógeno entre la superficie de las partículas y grupos OH presentes en el polímero.

#### **Concentración de iones:**

La concentración de iones en el medio, ejerce un papel destacado en la floculación de partículas con polímeros, pues puede provocar fuerzas de atracción o repulsión.

La presencia de iones en el medio, puede provocar alteraciones en el comportamiento de los polímeros, ya sea por la eventual adsorción de estos iones en los grupos pertenecientes a la molécula del polímero o, interfiriendo el desdoblamiento de los segmentos. En general, este hecho parece perjudicar la eficiencia de la floculación.

Por otro lado, el aumento en la concentración de iones, puede reducir el potencial zeta de las partículas, facilitando la aproximación y con ello la floculación.

De manera general, como resultado global, se verifica que un aumento de la concentración de iones en el medio, es perjudicial cuando se efectúa la floculación con polímero.

## 4 - El almidón como auxiliar

### 4.1 - Propiedades del almidón

#### 4.1.1 - Generalidades

El almidón se encuentra en abundancia en el reino vegetal, constituye la mayor reserva de carbohidratos de las plantas, y puede ser extraído de su fuente con relativa facilidad.

Entre las principales fuentes comerciales de almidón se tienen: maíz, yuca, papa, arroz, trigo, sagú, sorgo, araruta, etc.

La tabla No. 4.1 muestra algunos datos sobre la composición media de variedades comunes de maíz, trigo, yuca y papa.

**Tabla No. 4.1 - Porcentaje de almidón, proteínas, fibras y ceniza de algunas fuentes de almidón<sup>(57)</sup>.**

COMPONENTE	COMPOSICION (%)			
	Maíz	Trigo	Yuca	Papa
Almidón	55.5	64.0	21.5	20.0
Proteínas	8.2	12.5	1.1	2.1
Fibras	2.4	2.5	1.1	1.1
Ceniza	1.5	1.7	0.5	0.9

De manera general, el proceso de obtención del almidón, cualquiera que sea la fuente, obedece a una serie de operaciones fundamentales, con pequeñas variantes.

Después del lavado o limpieza inicial, se trituran los tubérculos o granos y se prepara una suspensión acuosa del material triturado. Después de ser removidos los fragmentos gruesos indeseables (tamizando, etc.), siguen varias operaciones destinadas a remover subproductos y a triturar nuevamente las partículas, para lograr la separación posterior del almidón por sedimentación natural o acelerada (centrifugando), y, eventualmente el gluten, por flotación, en condiciones especiales de concentración y pH.

El material sedimentado y lavado es enviado a filtros-prensa o centrifugas para reducir su contenido de humedad. La pasta o "torta" resultante de las operaciones anteriores se somete a secado final en tuneles de calefacción, secadores rotatorios, etc.

Terminadas estas operaciones el material seco es nuevamente triturado o molido hasta obtener un polvo muy fino.

Es evidente que la descripción presentada es apenas una síntesis general del procedimiento industrial, dado que existen muchos detalles relacionados con cada operación desarrollada y con cada fuente de almidón considerada. Además, para cada una de estas fuentes se conocen diversos métodos para obtener su almidón.

Además de esto, se debe resaltar que, la pulpa de estos vegetales, utilizada como base para producción de almidón, tiene estructura y composición bastante diferente.

A manera de ejemplo, se presentan algunas consideraciones sobre la papa, cuyo almidón se ha destacado como uno de los más apropiados auxiliares de floculación.

La pulpa de la papa, en estado natural, está constituida por grandes células, envueltas por una membrana celulósica que posee en su interior un elevado contenido de fluido celular en el cual están suspendidos los granos de almidón. Este fluido es una solución acuosa de proteínas, ácidos orgánicos (succínico, tartárico, cítrico, ascórbico, etc.), aminoácidos (aspargina y tirosina) y varias sales inorgánicas, entre las cuales están los fosfatos de potasio. El porcentaje de agua en el tubérculo es por lo tanto, relativamente elevado y varía entre el 65% y el 80%.

El porcentaje de almidón en la papa común (*Solanum tuberosum*) varía entre el 10% y el 25%, y en la papa (*Impomoea batata*), entre el 14% y el 28%.

El rendimiento del proceso industrial para la extracción del almidón de papa, en las instalaciones con equipos modernos, es aproximadamente del 95%.

#### 4.1.2 Composición del almidón

El almidón, comparado con otros carbohidratos, es un producto relativamente heterogéneo. Básicamente, se puede afirmar que el almidón es un carbohidrato altamente polimerizado cuyo monómero está representado por la glucosa. El principal problema de la química del almidón ha sido la determinación de la naturaleza y el número de uniones entre las unidades constituidas por los monómeros, y su distribución en la estructura del almidón.

Se conoce desde hace mucho tiempo, que el almidón está constituido por dos componentes

principales, que presentan propiedades bastante diferentes. Maquenne & Roux<sup>(62)</sup>, denominaron estas fracciones como amilosa y amilopectina. En realidad, cada una de estas fracciones, presenta subfracciones con propiedades específicas, dificultando la definición exacta de estos dos componentes. Muchos investigadores, desarrollaron métodos para lograr el fraccionamiento del almidón, y presentaron definiciones para la amilosa y la amilopectina fundamentadas en sus propios métodos.

El simple tratamiento del almidón con agua caliente, permite la extracción de una sustancia soluble. Maquenne & Roux<sup>(62)</sup>, denominan a esta parte soluble amilosa y a la parte insoluble amilopectina.

La separación de las dos fracciones fue conseguida por Gatin-Gruzenwska<sup>(41)</sup> tratando el almidón de papa con solución alcalina diluida, seguida por neutralización y sedimentación. En este caso, la amilosa sería la parte soluble y la amilopectina el residuo sedimentado.

Sherman & Baker<sup>(84)</sup> efectuaron la separación de las fracciones por medio de la centrifugación de una pasta de almidón de papa preparada con agua a 85°C.

Samec & Mayer<sup>(82)</sup> emplearon la electrodiálisis de una suspensión acuosa de almidón de papa a 120°C y Ling & Nanji<sup>(60)</sup> fraccionaron el almidón de papa a través del congelamiento, descongelamiento y centrifugación de una pasta acuosa de este almidón. El resultado de la operación de centrifugación sería la amilopectina.

Recientemente, otros autores desarrollaron nuevos métodos de fraccionamiento, empleando alcoholes para precipitar la fracción de amilosa. Entre estos autores pueden ser citados Schoch<sup>(86)</sup> y McCready & Hassid<sup>(72)</sup>.

La Tabla No. 4.2, muestra algunos resultados de ensayos efectuados por diversos autores, e indica el porcentaje de amilosa existente en el almidón de algunas fuentes.

**Tabla No. 4.2 Porcentaje de amilosa existente en el almidón de algunos vegetales<sup>(57)</sup>**

FUENTE	METODO				
	Butanol (Schoch)	Pentanol (Schoch)	Butanol (Higginbotham)	Butanol (Bates y otros)	Agua caliente y Butanol (Kerr)
Maíz	22	28-29	29	21	29
Yuca	21	—	18	17	20
Papa	22	—	—	22	26
Sagú	—	—	27	27	—
Arroz	—	—	—	17	—

Además de la amilosa y la amilopectina, forman parte de la composición del almidón muchos otros productos, aunque en porcentajes significativamente menores. Cuando se realiza la hidrólisis del almidón, se pueden encontrar pequeñas cantidades de residuos diferentes a los carbohidratos. Estos residuos son iones inorgánicos, ácidos grasos, lípidos y materiales nitrogenados, posiblemente originados de proteínas.

La estructura molecular de los dos componentes del almidón fue estudiada por primera vez por Hirst, Plant y Wilkinson<sup>(50)</sup>. Estos autores concluyeron que ambas fracciones poseían cadenas con un contenido de 24 a 30 unidades de glucopiranosas y que sus constituciones moleculares eran esencialmente las mismas. Las diferencias entre las propiedades de estas fracciones se explicarían con base en el diferente estado de hidratación, grado de agregación y disposición de las cadenas en forma de micelas.

El avance en los estudios, por parte de otros investigadores, llevó a concluir que las dos fracciones poseen diferente estructura molecular: la amilosa está constituida por largas cadenas no ramificadas, formadas por unidades de glucopiranosas, y la amilopectina, por cadenas ramificadas, también formadas por unidades de glucopiranosas.

Hassid & McCready<sup>(46)</sup>, obtuvieron posteriormente muestras de amilosa y amilopectina fraccionando el almidón de papa con el empleo de metanol. Ellos realizaron una serie de estudios buscando obtener alguna información sobre la estructura de la fracción. En resumen, las principales conclusiones encontradas en este trabajo fueron: la fracción de amilosa puede ser totalmente hidrolizada con  $\beta$ -amilasa a maltosa, al mismo tiempo que la amilopectina no es totalmente hidrolizada, consiguiendo apenas un porcentaje del 54%. La masa molecular de la amilosa, determinada por el método de la viscosidad (Standinger), resultó aproximadamente igual a 8000, lo que corresponde a un número de unidades de glucosa comprendido entre 300 y 400. La amilopectina mostró estar formada por cadenas

de 25 unidades de glucosa ligadas entre sí, constituyendo una estructura ramificada. La masa molecular de la amilopectina resultó aproximadamente igual a 92000. El porcentaje de amilosa en el almidón de papa, determinado por estos investigadores, fue del 20%.

Al mismo tiempo, Cales, llegó a conclusiones diferentes, en lo que se refiere a la masa molecular de las fracciones de almidón de papa. Este investigador obtuvo los siguientes resultados: masa molecular de la amilosa 185000 y masa molecular de la amilopectina 1000000.

La naturaleza de las fracciones del almidón de papa fue estudiada por diversos investigadores. Un aspecto para destacar, dentro de estos estudios, es la exploración de las propiedades de las cargas eléctricas de estas fracciones.

Gatin-Gruzenwska<sup>(41)</sup> observó que las pastas acuosas de almidón de papa podían ser fraccionadas por electroforesis. Con este procedimiento la amilopectina se deposita en el ánodo. Samec & Haerdtl<sup>(81)</sup> y Samec & Mayer<sup>(82)</sup> emplearon electro-sedimentación, colocando el ánodo en el fondo de la celda, para acelerar la sedimentación de la fracción de amilopectina.

Aparentemente, las moléculas de amilopectina son esterificadas con pequeñas cantidades de ácido fosfórico y el conjunto adquiere así suficiente polaridad, en razón a la ionización del grupo fosfato, para luego emigrar cuando se le somete a la acción de un campo eléctrico. La amilosa de papa contiene una cantidad despreciable (o nula) de fósforo.

Esta propiedad (moléculas esterificadas de amilopectina), está restringida únicamente al almidón de papa, pues los ensayos demuestran que la mayoría de las fuentes naturales contiene una cantidad insignificante o despreciable de compuestos esterificados con ácido fosfórico.

Schoch<sup>(83)</sup> realizó una serie de ensayos con la finalidad de verificar aspectos relacionados con la presencia de componentes diferentes de carbohidratos en algunos almidones. Este investigador encontró que el fósforo presente en la mayoría de los cereales se encuentra solamente en forma de fosfolípidos, y que, en el caso específico del almidón de papa, el fósforo se presenta más íntimamente ligado a la estructura molecular.

Schoch efectuó la extracción, empleando el método de Soxhlet, a 24 y 120 horas, utilizando solución al 80% de dioxano como solvente; los resultados mostraron que no hubo una reducción sensible del contenido de fósforo presente en el almidón. Inicialmente, en la muestra estudiada, había 0.095%; después de 24 horas de extracción, 0.087% y después de 120 horas, 0.084%, en concentración como fósforo (P).

Con relación a la estructura molecular de las fracciones que componen el almidón, se puede resumir lo siguiente: la amilosa se presenta en forma de una cadena lineal constituida por unidades de glucopiranosas con uniones  $\alpha$ -1, 4-disacáridos. La amilopectina posee estructura ramificada constituida por unidades de glucopiranosas, con uniones iguales a las encontradas en la amilosa; pero a intervalos periódicos, una unidad de glucopiranosas, que normalmente estaría unida a otras dos unidades, formando una columna lineal, se liga a una tercera unidad, dando origen a una ramificación.

Las Figuras Nos. 4.1, 4.2 y 4.3 presentan simplificada la estructura de las fracciones.

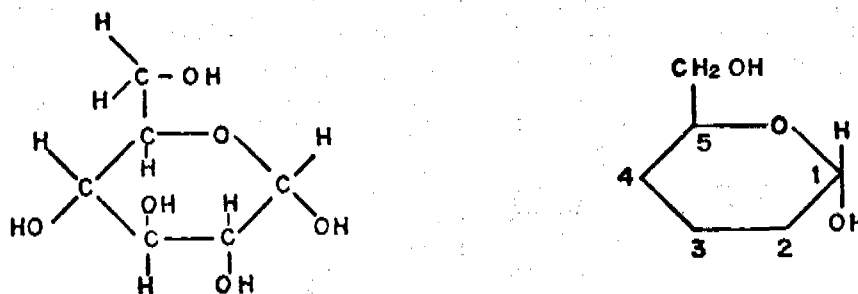


Fig. No. 4.1 - Estructura de la glucosa y su forma simplificada de notación.

Existen muchos estudios desarrollados con la finalidad de determinar el grado de polimerización para cada una de las fracciones, es decir para definir el número de monómeros que constituyen las moléculas.

La Tabla No. 4.3 muestra los resultados de algunas de estas investigaciones.

Las dos fracciones del almidón también difieren entre sí por la propiedad de producir diferentes coloraciones en presencia de yodo, y por lo tanto, sus soluciones acuosas presentan diferentes transmitancias cuando son sometidas a una radiación luminosa de la misma longitud de onda.

Las soluciones de amilosa, en presencia de yodo, producen un color azul intenso, y con la amilopectina un color violeta.



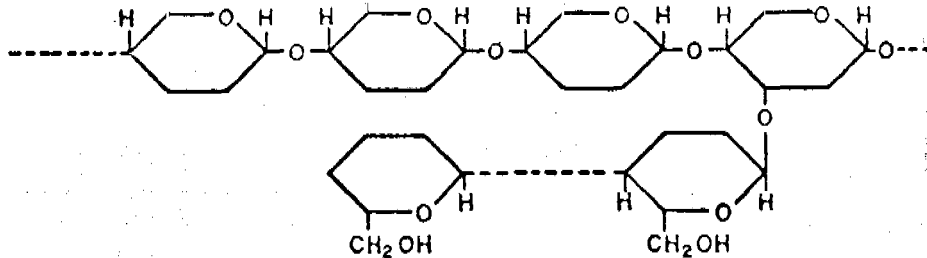


Fig. No. 4.3 - Estructura (simplificada) de las moléculas ramificadas de almidón: amilopectina<sup>(57)</sup>.

Bates et alii<sup>(13)</sup>, efectuaron estudios sobre la titulación potenciométrica con yodo, en soluciones de ambas fracciones del almidón. Estos estudios mostraron la viabilidad de efectuar la determinación del porcentaje de cada una de las fracciones presentes en el almidón con base en sus diferentes propiedades, bajo la acción del yodo.

Baldwin et alii<sup>(12)</sup>, determinaron la transmitancia de diversas soluciones de almidón, de amilosa y de amilopectina, empleando el espectrofotómetro (Coleman 105). En este caso, las muestras se colocaron en cubetas de 13.00 mm y 1.63 mm de espesor. La Figura No. 4.4 permite observar la diferencia sensible que existe entre los valores de transmitancia determinados para soluciones de amilosa y de amilopectina a las cuales se les adiciona una pequeña cantidad de yodo.

Tabla No. 4.3 - Número de monómeros en las fracciones de almidón<sup>(57)</sup>.

FRACCION	FUENTE	INVESTIGADORES							
		SAMEC	FOX	DUMBROW	HORAN	FOSTER & HIXON	CAESAR et alii	MEYER et alii	KERR
Amilosa	Maíz		540	375		260-275	220	270	455-225
	Yuca			525		460			1050
	Papa	770			1850-3700		980		850
Amilopectina	Maíz							1300	1450
	Yuca								1300
	Papa	1450			6000				

Se nota que la transmitancia mínima relacionada con la amilosa de papa ocurre para una longitud de onda aproximadamente igual a 5600 Å y para la amilopectina a 6250 Å.

De acuerdo con la bibliografía consultada, la hipótesis más aceptada para explicar la naturaleza de los complejos yodo-almidón, se basa en la idea de que las cadenas lineales formadas por las unidades de glucosa tienen una estructura helicoidal, de modo que en condiciones ideales, a cada 6 unidades de glucosa, corresponde una molécula de yodo<sup>(40)</sup>. La Figura No. 4.5 presenta el modelo propuesto por Freudenberg.

enzimas que mediante licuefacción o solubilización pueden degradar en forma completa las moléculas de almidón; b) enzimas que inducen la degradación del almidón hasta productos clasificados como dextrinas, produciendo también pequeñas cantidades de azúcares; c) enzimas que hidrolizan el almidón en un elevado porcentaje a azúcares, como maltosa y dextrosa; d) enzimas que fraccionan la molécula de almidón, introduciendo grupos químicos; e) enzimas que inducen el fraccionamiento de las moléculas de almidón, seguido por el "reordenamiento" de los compuestos formados.

La acción de los dos últimos tipos de amilasa puede ser clasificada de acuerdo con las siguientes subdivisiones: licuefacción, dextrinización y sacarificación.

aguas naturales<sup>(23)</sup>, se ensayaron inicialmente ocho muestras, recolectadas en diferentes manantiales, en las proximidades de la ciudad de São Carlos, S.P., Brasil. En tres de estas muestras se adicionaron pequeñas cantidades de yodo y/o bicarbonato de sodio, de modo que fuera posible la obtención de aguas con valores más elevados de turbiedad y/o alcalinidad.

La Tabla No. 4.7 presenta la franja de valores estudiados para diversos parámetros de importancia en la floculación.

**Tabla No. 4.7 - Intervalo de variación de las principales características de las muestras estudiadas**

PARAMETRO	VALOR MINIMO	VALOR MAXIMO
Turbiedad (UJ)	10.0	86.0
Color (mg/l de Pt-Co)	40	200
pH	6.4	7.2
Alcalinidad (mg/l de CaCO <sub>3</sub> )	9.5	53.4
Potencial Zeta (mV)	-14.6	-27.6
Conductividad Especifica ( $\mu$ mho/cm)	18	100

Los resultados, en esta fase de la investigación, también fueron bastante favorables, pues, de las ocho muestras ensayadas, fue confirmada la aplicabilidad del almidón como auxiliar de floculación para 6 (seis) de ellas, considerando los aspectos relativos a costos y a calidad del sobrenadante.

La conclusión fue muy importante en esta ocasión, porque permitió acreditar la posibilidad del empleo de este polímero natural en un gran número de aguas provenientes de diversas fuentes superficiales.

### Ensayos con almidón de diferentes fuentes

Se presentan a continuación los resultados y conclusiones de la investigación realizada<sup>(25)</sup> con el objetivo de verificar la viabilidad del empleo de almidón de diversas fuentes naturales, como auxiliar de floculación.

El almidón utilizado en los ensayos de floculación fue pre-gelatinizado a través de dos métodos distintos. Algunos ensayos fueron efectuados con almidón pre-gelatinizado mediante calentamiento, y otros fueron efectuados con almidón pre-gelatinizado mediante adición de hidróxido de sodio, en frío.

Se utilizó almidón proveniente de cinco fuentes naturales distintas: papa, maíz, yuca, araruta y cará.

Inicialmente también se evaluó el almidón de arroz, pero los resultados fueron insatisfactorios.

Cada almidón se evaluó a través de ensayos de floculación con cuatro muestras distintas, que presentaban diferentes características de color, turbiedad, pH y alcalinidad.

Para el análisis de cada una de las muestras fue necesaria la ejecución de aproximadamente setenta ensayos de floculación ("jar-test") con el objetivo de conocer las dosis óptimas de sulfato de aluminio y de cal (cuando era necesaria), y la dosis más conveniente de almidón. También se realizaron ensayos especiales con el objetivo de verificar la influencia del gradiente de velocidad en la calidad del sobrenadante. Por lo tanto, las conclusiones presentadas en este trabajo están basadas en los resultados de cerca de 280 ensayos de floculación.

### Ensayos de floculación

Los ensayos de floculación, para cada muestra, se realizaron con el fin de caracterizar tres etapas distintas.

La primera etapa tenía como objetivo la determinación de las dosis óptimas de sulfato de aluminio y de cal (de ser necesaria), y también la dosis más conveniente de cada almidón evaluado.

En esta etapa se realizaron ensayos de floculación bajo las siguientes condiciones:

- Volumen de cada reactor: 2000 ml
- Gradiente de velocidad durante la mezcla rápida: 500 s<sup>-1</sup>
- Tiempo total de mezcla rápida: 180 s
- Gradiente de velocidad durante la floculación: 50 s<sup>-1</sup>

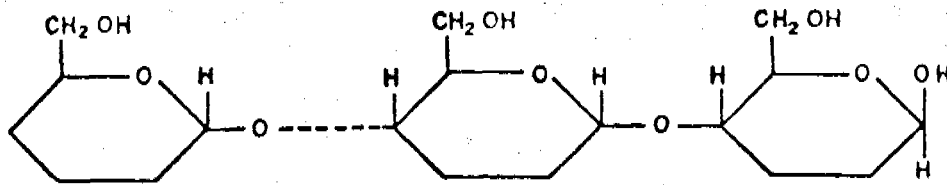


Fig. No. 4.2 - Estructura (simplificada) de las moléculas lineales de almidón: amilosa<sup>(57)</sup>.

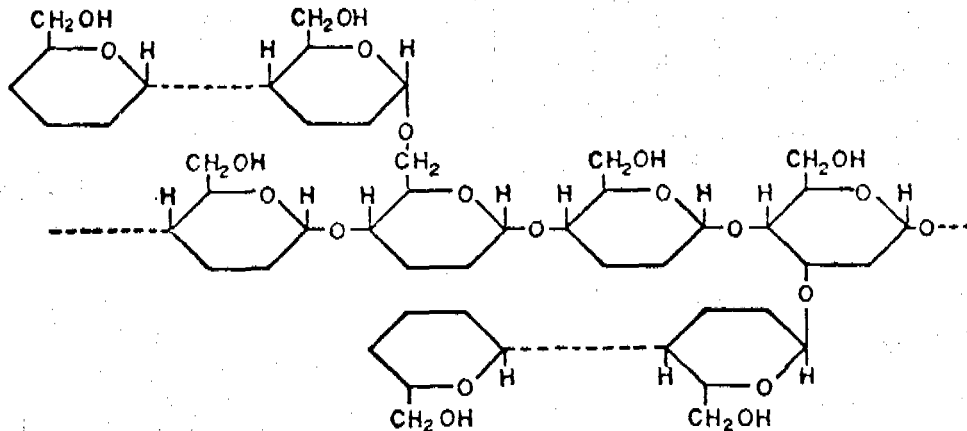


Fig. No. 4.3 - Estructura (simplificada) de las moléculas ramificadas de almidón: amilopectina<sup>(57)</sup>.

Bates et alii<sup>(13)</sup>, efectuaron estudios sobre la titulación potenciométrica con yodo, en soluciones de ambas fracciones del almidón. Estos estudios mostraron la viabilidad de efectuar la determinación del porcentaje de cada una de las fracciones presentes en el almidón con base en sus diferentes propiedades, bajo la acción del yodo.

Baldwin et alii<sup>(12)</sup>, determinaron la transmitancia de diversas soluciones de almidón, de amilosa y de amilopectina, empleando el espectrofotómetro (Coleman 105). En este caso, las muestras se colocaron en cubetas de 13.00 mm y 1.63 mm de espesor. La Figura No. 4.4 permite observar la diferencia sensible que existe entre los valores de transmitancia determinados para soluciones de amilosa y de amilopectina a las cuales se les adiciona una pequeña cantidad de yodo.

Tabla No. 4.3 - Número de monómeros en las fracciones de almidón<sup>(57)</sup>.

FRACCION	FUENTE	INVESTIGADORES							
		SAMEC	FOX	DUMBROW	HORAN	FOSTER & HIXON	CAESAR et alii	MEYER et alii	KERR
Amilosa	Maíz		540	375		260-275	220	270	455-225
	Yuca			525		460			1050
	Papa	770			1850-3700		980		850
Amilopectina	Maíz							1300	1450
	Yuca								1300
	Papa	1450			6000				

Se nota que la transmitancia mínima relacionada con la amilosa de papa ocurre para una longitud de onda aproximadamente igual a 5600 Å y para la amilopectina a 6250 Å.

De acuerdo con la bibliografía consultada, la hipótesis más aceptada para explicar la naturaleza de los complejos yodo-almidón, se basa en la idea de que las cadenas lineales formadas por las unidades de glucosa tienen una estructura helicoidal, de modo que en condiciones ideales, a cada 6 unidades de glucosa, corresponde una molécula de yodo<sup>(40)</sup>. La Figura No. 4.5 presenta el modelo propuesto por Freudenberg.

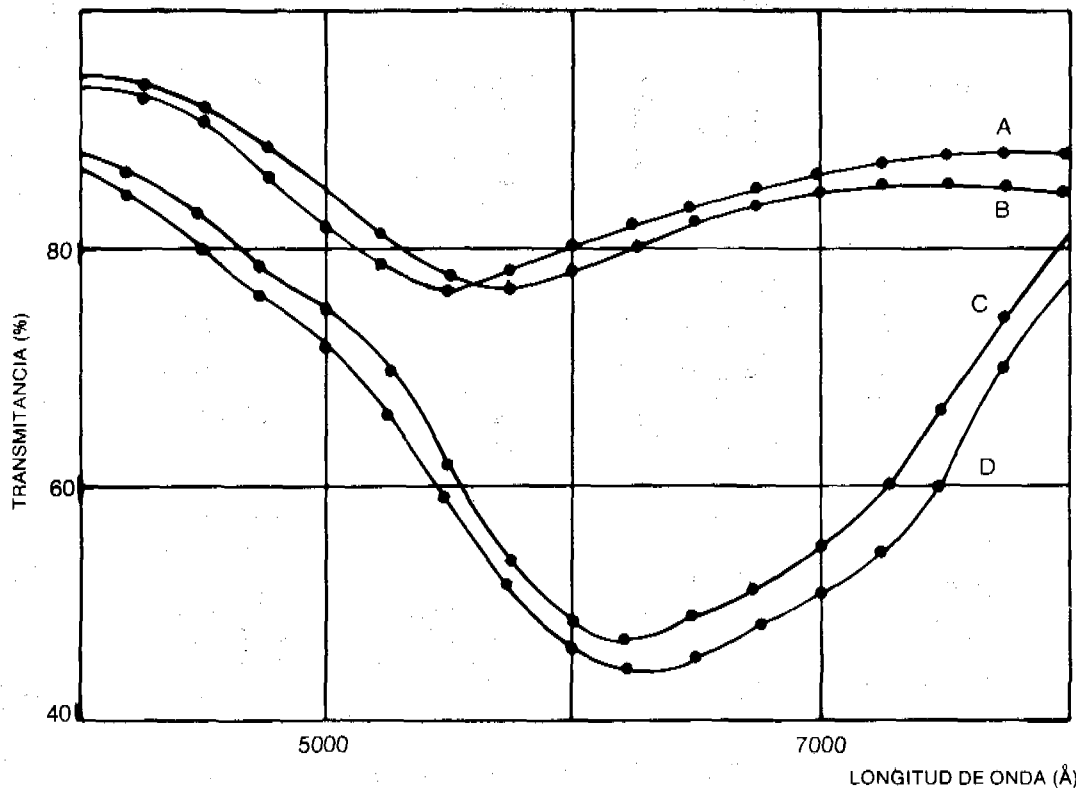


Fig. No. 4.4 Curvas de transmittancia de soluciones que contienen complejos de yodo-amilosa y de yodo-amilopeptina. Concentración de yodo 0.00005 M. Concentración de almidón o fracciones 0.01% (A: amilopeptina de papa; B: amilopeptina de maíz; C: amilosa de maíz y D: amilosa de papa)<sup>(112)</sup>.

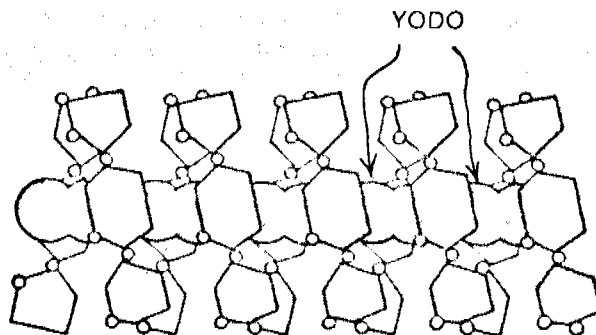


Fig. No. 4.5 Modelo simplificado que muestra la disposición helicoidal de la cadena lineal de almidón con moléculas de yodo en su eje<sup>(40)</sup>.

Además de la presencia de amilosa y amilopeptina en la formación del almidón, se puede encontrar también otra serie de productos diferentes de los carbohidratos, aunque en un porcentaje significativamente menor. Existen muchas hipótesis para explicar la presencia de estos productos en los diversos almidones, pero en forma general, se debe destacar que casi todas las sustancias o iones presentes poseen la función ácido. De esta manera, se presume que algunos grupos hidroxilo, que participan en las estructuras fundamentales del almidón, son esterificados por estos ácidos.

La Tabla No. 4.4 presenta el porcentaje de algunos constituyentes, diferentes de los carbohidratos, presentes en algunos almidones.

Para finalizar esta pequeña exposición sobre la composición del almidón, es importante destacar que el análisis de los diversos trabajos consultados, muestra que para el conocimiento profundo y preciso de la estructura del almidón, hay necesidad de desarrollar muchos trabajos que deberán confirmar y precisar las ideas vigentes, pues realmente el estudio del almidón abarca un campo muy complejo que no ha sido explorado totalmente.

#### 4.1.3 - Algunas propiedades del almidón<sup>(57)</sup>

##### Hinchamiento, gelatinización y retrogradación

La ruptura de la estructura del grano de almidón, en presencia de agua caliente, se desarrolla en

tres fases distintas. Durante la primera fase, ocurre apenas un hinchamiento limitado y la viscosidad de la suspensión no aumenta de manera sensible. El grano, conserva aún su apariencia y, después del secado, no es posible notar gran alteración.

Cuando se sobrepasa una temperatura próxima a 65°C (la temperatura exacta depende de la naturaleza del almidón), se inicia la segunda fase del hinchamiento. En esta fase, el grano aumenta su volumen muchas veces en relación con su volumen original y la viscosidad de la suspensión aumenta en forma significativa. El grano pierde su estructura original y al mismo tiempo ocurre la solubilización de una pequeña parte de su contenido.

Durante la tercera fase, que ocurre a temperaturas aún más elevadas, evolucionan en forma más acentuada los fenómenos observados durante la segunda fase. El calentamiento prolongado provoca, en esta tercera fase, la reducción de la viscosidad de la solución.

**Tabla No. 4.4 Algunos componentes, diferentes de carbohidratos, presentes en el almidón de diversas fuentes.** <sup>(37)</sup>

COMPONENTE	PORCENTAJE (%)						
	Papa	Trigo	Maíz	Arroz	Sagú	Yuca	Araruta
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.176-0.287	0.145-0.265	0.045-0.069	0.015-0.243	0.054	0.017-0.062	
SiO <sub>2</sub>	0.069	0.019	—	—	—	—	—
SO <sub>3</sub>	0.008	0.066	—	—	—	—	—
CaO	0.058	0.042	0.024	0.014	0.025	0.015	0.112
MgO	0.001	0.026	0.014	0.040	0.005	0.005	0.003
K <sub>2</sub> O	0.018-0.072	0.027-0.087	0.028	0.083	0.082	0.024	0.028
Na <sub>2</sub> O	0.008	0.032	0.041	0.283	0.032	0.027	0.020
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	trazas	trazas	—	—	—	—	—
N	0.0113	0.0488	—	—	—	—	—
Mat. Graso	0.04	—	0.61	0.83	0.11	0.12	—

El hinchamiento puede ser inducido a temperatura ambiente por muchos agentes, entre los que se destacan los productos que tienen comportamiento básico. Las soluciones de almidón que permanecen almacenadas a temperatura ambiente o a temperaturas más bajas, sufren el fenómeno de retrogradación. Una parte del almidón se agrega progresivamente y finalmente forma un precipitado microcristalino insoluble. En forma general, la amilosa, presenta tendencia más acentuada a la retrogradación que la amilopectina. Una solución de amilosa de maíz, con concentración igual al 1%, después de pocos días de almacenamiento, tiene prácticamente todo el soluto sedimentado en forma cristalina, como consecuencia de la retrogradación. La retrogradación puede ser atenuada por la adición, a la suspensión, de agentes que induzcan el hinchamiento o, también, manteniendo la temperatura de la suspensión por encima de la temperatura ambiente.

#### ***Acción de las enzimas sobre el almidón***

El almidón, bajo la acción de las amilasas, puede tener sus moléculas fraccionadas o agrupadas. Las reacciones químicas que ocurren bajo la actividad de estas enzimas dependen del pH del medio, la temperatura, el sustrato, el tipo específico de enzima, etc.

Las fuentes más comunes para la preparación de las amilasas son: el páncreas, la malta y ciertas especies de hongos y bacterias.

Las amilasas tienen la función de catalizador en las reacciones que modifican la molécula de almidón. De manera simplificada, se pueden clasificar estas enzimas en los siguientes grupos: a) enzimas que mediante licuefacción o solubilización pueden degradar en forma completa las moléculas de almidón; b) enzimas que inducen la degradación del almidón hasta productos clasificados como dextrinas, produciendo también pequeñas cantidades de azúcares; c) enzimas que hidrolizan el almidón en un elevado porcentaje a azúcares, como maltosa y dextrosa; d) enzimas que fraccionan la molécula de almidón, introduciendo grupos químicos; e) enzimas que inducen el fraccionamiento de las moléculas de almidón, seguido por el "reordenamiento" de los compuestos formados.

La acción de los dos últimos tipos de amilasa puede ser clasificada de acuerdo con las siguientes subdivisiones: licuefacción, dextrinización y sacarificación.

## **Algunas reacciones**

El almidón presenta posibilidades extraordinarias para su uso industrial, teniendo en cuenta sus propiedades específicas y las reacciones en las cuales puede participar, para la formación de productos secundarios.

Directa o indirectamente, el almidón es utilizado principalmente en las siguientes actividades: industria de la cerámica, producción de papel, producción de sustancias a través de fermentación (etanol, acetona, ácido láctico, glicerol, ácido gluconico, etc.), producción de antibióticos, industria de alimentos, industria textil, industria de adhesivos, industria de cosméticos, metalurgia, fabricación de explosivos, minería, etc.

En muchas de sus aplicaciones puede ser utilizado aun sin el suficiente conocimiento científico de sus reacciones específicas.

No es el propósito de este trabajo la descripción detallada de las propiedades químicas del almidón, por lo cual sólo se citarán aquellas que están más directamente relacionadas con los grupos que conforman su estructura.

Como el almidón está compuesto por unidades de glucosa, interligadas por enlaces glucosídicos, las moléculas pueden ser hidrolizadas por ácidos en algunos (o en todos) los puntos donde ocurre este tipo de unión.

— Puede ocurrir condensación de moléculas, teniendo en cuenta la disponibilidad, al menos en forma potencial, del grupo aldehído.

— Como las moléculas poseen grupos alcohol de tipos primario y secundario, y grupos aldehído, podrán ser oxidadas en uno o en muchos de estos puntos.

— Los grupos alcohol pueden dar origen a ésteres, cuando actúan bajo la acción de ácidos orgánicos o inorgánicos.

— Los grupos hidroxilo del almidón pueden ser convertidos en éteres y alcoholatos por la acción de metales o hidróxidos metálicos.

— El almidón puede sufrir degradación, produciendo otros compuestos de menor peso molecular, por la acción de ciertos agentes oxidantes, o por la acción de enzimas, o por la acción intensa del calor.

## **4.2 Uso del almidón como auxiliar de floculación**

### **4.2.1 Preparación de la suspensión de almidón**

#### **4.2.1.1 Generalidades**

El almidón a ser utilizado en investigaciones, en ensayos de laboratorio y en plantas de tratamiento de agua, debe ser sometido previamente a un proceso inicial para lograr su gelatinización.

En los primeros ensayos realizados en la EESC-USP fue utilizada la técnica de gelatinización en caliente y recientemente, inclusive en aplicaciones en plantas de tratamiento, ha sido empleada la técnica de gelatinización con hidróxido de sodio<sup>(22) (23) (25)</sup>.

Las moléculas de almidón, bien sean las de amilopectina o las de amilosa, se encuentran encerradas en una envoltura que debe romperse para permitir su liberación al medio líquido.

La ruptura de la membrana envolvente puede ser lograda a través de calentamiento, conforme con lo descrito en 4.1.3 o a través de la adición de soda cáustica en una suspensión concentrada del almidón a ser tratado.

Ambas alternativas son de fácil ejecución en plantas de tratamiento de agua, pero la gelatinización con soda cáustica, en frío, ha sido la escogida en la casi totalidad de los casos, por el hecho de no exigir sistema especial de calentamiento.

Se describe a continuación la metodología para la preparación de estas suspensiones, en el laboratorio.

Naturalmente, el primer requisito que se debe exigir de la materia prima para los ensayos, es la calidad del almidón, pues el material debe estar pulverizado finamente y exento de impurezas para que la gelatinización y la disolución en el agua se realicen en forma adecuada.

#### **4.2.1.2 Preparación de la suspensión de almidón en el laboratorio**

La preparación de la suspensión de almidón en caliente, en el laboratorio, se obtiene de acuerdo con los siguientes pasos<sup>(23)</sup>:

- Disolver 1000 mg de almidón en 1000 ml de agua destilada fría.
- Calentar la muestra hasta que hierva, agitando, para evitar la formación de grumos.
- Hervir por cerca de 10 min, sin dejar de agitar.
- Dejar enfriar la muestra hasta la temperatura ambiente.
- Completar el volumen hasta 1000 ml para compensar el que se ha perdido por evaporación.

Esta suspensión puede ser almacenada hasta por dos días. Después de ese tiempo, no se recomienda su uso.

En el momento de realizar el ensayo de floculación o de filtración, se puede preparar la suspensión más diluida para facilitar la operación de medición para la dosificación.

Diluyendo de 1:10 la suspensión preparada, se obtiene una relación muy conveniente para trabajar, o sea, cada ml de suspensión corresponderá a 0.1 mg de almidón. Esa suspensión diluida debe ser usada únicamente el día de su preparación.

La gelatinización en frío, debe ser efectuada llevando a cabo los siguientes pasos<sup>(22)</sup>:

- Colocar 1000 mg de almidón en un vidrio de reloj.
- Adicionar cerca de 10 ó 20 ml de agua destilada fría e inducir la disolución del almidón (dependiendo del almidón hay necesidad de agregar más agua para evitar la formación de grumos).
- Adicionar lentamente 200 mg de soda cáustica (NaOH), previamente diluida en 2 a 4 ml de agua destilada.
- Efectuar la mezcla mediante agitación con una varilla de vidrio, hasta obtener una perfecta homogenización.
- Tras sucesivos lavados del vidrio de reloj, con agua destilada, pasar la suspensión preparada a un recipiente (balón volumétrico), que permite completar con precisión un volumen de 1000 ml.
- Dejar esta solución en reposo por cerca de una hora para completar la disolución.

Esta solución puede ser guardada por dos días. En el momento en que se realicen las evaluaciones o ensayos, la suspensión puede ser diluida 1:10 para facilitar la operación de dosificación. Es conveniente agitar antes de aplicar cada dosis.

Vale la pena destacar que existen fórmulas empíricas que permiten estimar la cantidad de soda necesaria para efectuar la disolución del almidón, sin embargo la relación 1:5 (soda cáustica: almidón) parece ofrecer buen resultado, sin necesidad de efectuar estimaciones específicas.

Naturalmente, es ventajoso que al utilizar un almidón de determinada fuente, se efectúen pruebas para evaluar la proporción ideal entre los dos productos que optimice los resultados de floculación y/o filtración.

#### 4.2.1.3. Preparación de la suspensión de almidón en plantas de tratamiento.

Para efectuar la dilución, mezcla y dosificación de la suspensión de almidón, pueden ser utilizadas las instalaciones que usualmente se emplean en la aplicación de polímeros comerciales sintéticos o naturales, en plantas de tratamiento.

La instalación típica de los tanques que contienen la solución y de las bombas dosificadoras, se muestra en la Figura No. 4.6.

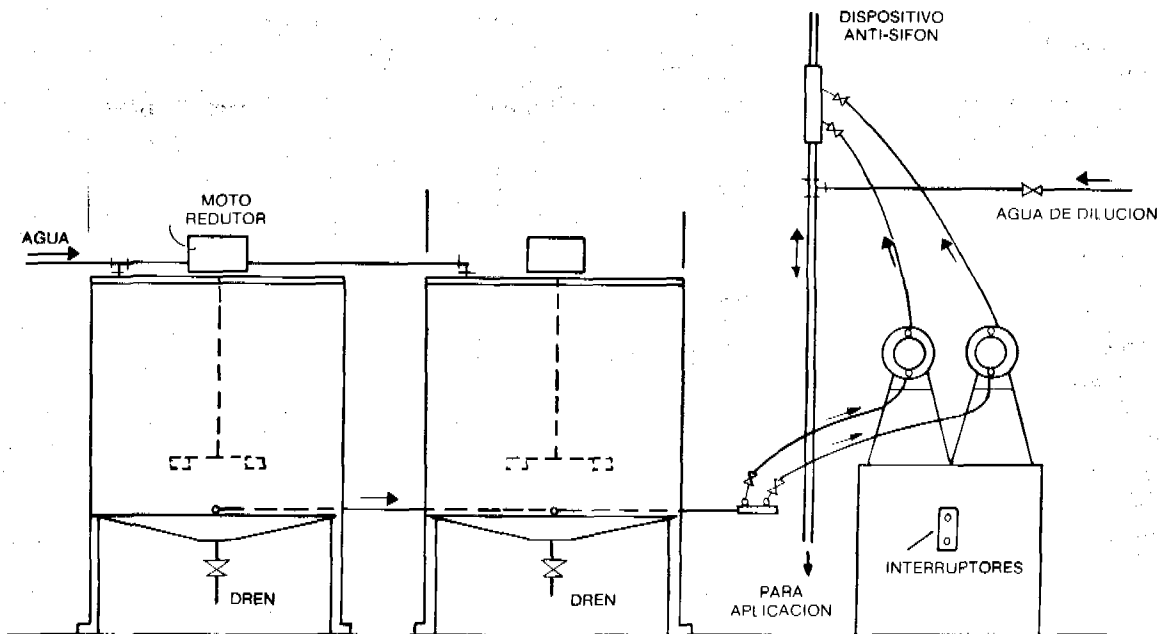


Fig. No. 4.6. Ejemplo de una instalación para preparación y dosificación de soluciones de polímeros comerciales<sup>(23)</sup>.

Para la utilización de almidón gelatinizado en frío, pueden ser empleadas las instalaciones mencionadas anteriormente sin ninguna modificación.

Cuando se utiliza el almidón gelatinizado en caliente, es necesario contar con un tanque con agitador y sistema de calefacción, en la planta de tratamiento, en el piso superior a aquel donde se encuentra el sistema mostrado en la Figura No. 4.6. Naturalmente los tanques, ya usados (Figura No.

4.6.), pueden ser adaptados para ese fin, introduciendo en los mismos, dispositivos para calentar la suspensión de manera que se consiga una temperatura superior a 85° C.

Además de esto, no existen restricciones en el caso de que se efectúe la gelatinización en un recipiente instalado al lado del sistema de mezcla y de dosificación usual, siempre y cuando se cuente con medios prácticos para transferir el almidón gelatinizado en caliente hacia los tanques de la solución.

Para preparar la suspensión en caliente en plantas de tratamiento de agua, se recomienda llevar a cabo el siguiente procedimiento básico<sup>(23)</sup>, suponiendo que se cuenta con un equipo de calentamiento independiente del sistema usualmente utilizado para la mezcla y la dosificación:

- Llenar el calentador con agua y después adicionar almidón de modo que se obtenga una concentración menor del 5% en peso (ese valor podrá variar, en función del almidón), pues pueden surgir dificultades subsecuentes a la elevación significativa de la viscosidad de la suspensión, que impidan la adecuada realización de la posterior disolución.
  - Mezclar adecuadamente la suspensión.
  - Efectuar el calentamiento, agitando constantemente hasta lograr una temperatura superior a 85°C.
  - Mantener el sistema caliente y bajo agitación, durante 30 min, a partir del momento en que se lograron los 85°C.
  - Dejar enfriar un poco la suspensión y transferirla al tanque de disolución (que deberá contener un poco de agua fría al recibir la suspensión de almidón gelatinizado).
  - Sin dejar de agitar, introducir más agua fría, de manera que la concentración de la suspensión tenga valores entre 0.5 y 1.5%.
  - Después de una hora de agitación, se puede iniciar la aplicación en la planta de tratamiento.
- En caso de que el sistema de calentamiento sea instalado en el propio tanque de solución y mezcla, estos pasos se simplificarán, pero, en esencia se deben seguir las mismas etapas del procedimiento descrito anteriormente.

Para la preparación del almidón en frío, a ser aplicado en plantas de tratamiento, se recomienda el siguiente procedimiento básico:

- Colocar solamente una parte de agua (y el almidón necesario) en el tanque de solución (sin llenarlo) de tal forma que la concentración de almidón sea del orden del 10% en peso (este valor varía de acuerdo con la fuente del almidón).
- Agitar durante 10 min para que la mezcla resulte homogénea.
- Adicionar lentamente una solución bastante concentrada de soda cáustica, de manera que la cantidad añadida sea igual al 20% de la masa de almidón utilizada.
- Agitar la suspensión hasta observar la inexistencia de grumos.
- Completar el volumen del tanque de solución hasta alcanzar concentraciones del orden de 0.5 a 1.5% en masa, manteniendo siempre el sistema bajo agitación.

Para seleccionar la soda cáustica es recomendable hacer un análisis de sus impurezas, pues es probable que este producto se contamine con mercurio como consecuencia de un ineficiente control de calidad durante la producción.

Tanto en el caso de la dilución en frío como en caliente, la suspensión de almidón, después de pasar por la bomba dosificadora, puede ser diluida mediante la introducción de agua adicional en el canal que la conduce hasta el punto de aplicación. Esta práctica, común cuando se usan polímeros comerciales, tiene la ventaja de lograr una mejor disolución del almidón en el agua que se va a tratar.

#### **4.2.1.4. Cálculo de la concentración de almidón en el agua para abastecimiento.**

De acuerdo con lo descrito en 4.1.2, la concentración del almidón puede ser determinada a través de la utilización de yodo, empleando titulación potenciométrica o espectrofotometría. Se puede inclusive, determinar los porcentajes de amilosa y de amilopectina que participan en la composición del almidón empleado.

El fraccionamiento del almidón<sup>(24)</sup> en amilosa y amilopectina, no será descrito en el presente trabajo, por no ser éste su propósito y además no requerirse para la utilización práctica del almidón como auxiliar de floculación y/o filtración.

La determinación de la concentración de almidón en suspensión acuosa, puede ser interesante para calcular la concentración real de almidón en una muestra de ese producto y para obtener el residual existente en determinada muestra de agua. Siendo así, se harán algunas observaciones acerca de la técnica de laboratorio para la determinación de las concentraciones de almidón, empleando el espectrofotómetro<sup>(25)</sup>:

- Inicialmente se prepara una solución que contenga 0.2% de yodo y 4% de yoduro de potasio. Esta solución es una solución-madre, que en el momento de ser utilizada en determinaciones de concentración de almidón, deberá ser diluida 1:10.
- En una muestra de 50 ml de suspensión acuosa se deben adicionar 0.5 ml de la solución descrita anteriormente, ya diluida. Cuando la concentración de almidón es bastante baja, adicionalmente se puede agregar a la muestra cristales de yodato de potasio.
- Ajustar el pH cerca a 7.0 (adicionando solución de HCl o NaOH diluida).



- Colocar la muestra en una celda de cuarzo de 10 mm o 100 mm y llevarla espectrofotómetro. Cuando la concentración ha sido bastante diluida, debe utilizarse la celda de 100 mm.
- Fijar la longitud de onda en el valor utilizado para la curva de calibración.
- Efectuar la lectura de la transmitancia.
- Comparar el valor obtenido con la curva de calibración previamente elaborada, para así obtener la concentración de almidón.

En la construcción de la curva de calibración, se destaca el hecho de que los valores ideales para el estudio de la amilosa, se encuentran entre 600  $\eta\text{m}$  y 650  $\eta\text{m}$  y, para el estudio de la amilopectina, entre 500  $\eta\text{m}$  y 600  $\eta\text{m}$ <sup>(23)</sup>. Como el almidón está compuesto por moléculas de amilosa y de amilopectina, en diferentes proporciones, de acuerdo con la fuente vegetal y con su naturaleza, es evidente que para escoger la longitud de onda a utilizar en la construcción de la curva de calibración y para la realización de las determinaciones, se deben efectuar ensayos iniciales, variando dicha longitud de onda entre 500 y 600  $\eta\text{m}$ .

La longitud de onda a la cual corresponde el menor valor de transmitancia para una muestra que contiene el almidón a ser estudiado, es precisamente la que deberá ser utilizada para construir la curva de calibración.

La celda debe ser escogida en función de la concentración del almidón y de la precisión deseada.

## 4.2.2. Ensayos de laboratorio.

### 4.2.2.1. Estudios iniciales

A continuación se presentarán, en forma resumida, los resultados de los primeros pasos que constituyen la base del conocimiento que llevó a demostrar la viabilidad del empleo del almidón como auxiliar para la clarificación de las aguas<sup>(23) (24) (25)</sup>.

Inicialmente se realizaron ensayos con agua preparada, con el objeto de obtener un conocimiento académico sobre la viabilidad de la técnica y su posterior extrapolación para casos prácticos. Estos primeros ensayos fueron realizados, empleando almidón de papa<sup>(23)</sup>.

A continuación se efectuaron ensayos utilizando muestras recolectadas en diversos ríos existentes en las proximidades del laboratorio de Saneamiento de la Escuela de Ingeniería de São Carlos (USP), para comprobar el porcentaje probable de resultados favorables, en el caso de que se extendiera el interés en la aplicación de almidón en las aguas naturales de la región<sup>(23)</sup>.

Se realizaron otra serie de ensayos para verificar la viabilidad de la aplicación de almidón de otras fuentes naturales, diferentes de la papa, y también para observar la influencia del proceso de gelatinización del almidón (en caliente o con soda cáustica) en la eficiencia de la floculación para la remoción del color y de la turbiedad.

Es importante destacar que estos estudios fueron realizados antes de conocer técnicas más modernas para ensayos de laboratorio, tales como los diagramas de coagulación, y, por ende, las conclusiones fueron obtenidas principalmente con base en curvas de sedimentación convencionales.

### Ensayos de floculación con muestras de agua preparada

Esta fase de los estudios<sup>(23)</sup> se realizó con el objeto de conocer algunos aspectos específicos del empleo del almidón de papa como auxiliar de floculación, bajo condiciones controladas. Para ello, fue necesario la definición de la "composición" de aguas preparadas en el laboratorio, de modo que los parámetros relacionados con la coagulación y la floculación fuesen razonablemente conocidos. Para que el número de ensayos no se tornara excesivo, el valor del pH fue fijado en 6.5, variándose la turbiedad y la alcalinidad. Se estudiaron dos valores de turbiedad, combinados con dos valores de alcalinidad, obteniendo así cuatro muestras distintas. Las principales características de las muestras se pueden observar en la Tabla No. 4.5.

Tabla No. 4.5. - Principales características de las muestras estudiadas

PARAMETRO	AGUA TIPO			
	III	IV	V	VI
pH	6.5	6.5	6.5	6.5
Turbiedad (UJ)	25.0	55.0	25.0	55.0
Alcalinidad (mg/l de CaCO <sub>3</sub> )	45.0	45.0	19.0	19.0
Conductividad Específica ( $\mu\text{mho/cm}$ )	110	115	58	58
Potencial Zeta (mV)	-34.0	-42.0	-34.0	-42.0

Para producir turbiedad se utilizó una suspensión madre de arcilla (caolín K-3, de la Fisher Scientific Company) preparada y estudiada previamente; y para producir alcalinidad se empleó

bicarbonato de sodio. El pH de las muestras se ajustó a 6.5, con ácido clorhídrico 0.1 N, antes de la realización de los ensayos.

El agua utilizada para la preparación de las muestras era desionizada y los productos empleados eran de excelente calidad.

Para todas las muestras evaluadas, cuando se empleó el almidón como auxiliar, fue posible la obtención de un sobrenadante con turbiedad mucho más baja que la obtenida cuando se utilizó solamente sulfato de aluminio y cal. Además, siempre se pudo reducir sensiblemente el valor de las dosis óptimas de estos productos (entre 20% y 40%), de modo que, aparte de mejorar la calidad del agua, se produjo una gran reducción en los gastos totales de productos empleados en la floculación.

Las Figuras Nos. 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10 muestran las curvas de sedimentación correspondientes a los ensayos que presentaron los resultados más interesantes relativos a cada una de las muestras estudiadas. En estos ensayos se mantuvieron las siguientes condiciones<sup>(23)</sup>

- $T_0$ : Turbiedad inicial;
- $T_f$ : Turbiedad después del tiempo de decantación considerado
- Tiempo de mezcla rápida: 120 s.
- Gradiente de velocidad durante la mezcla rápida  $300 \text{ s.}^{-1}$
- Gradiente de velocidad durante la floculación:  $50 \text{ s.}^{-1}$
- Adición de productos químicos: el sulfato de aluminio se adicionaba al inicio del tiempo de mezcla y el almidón (cuando se empleó), se adicionaba 60 s después.

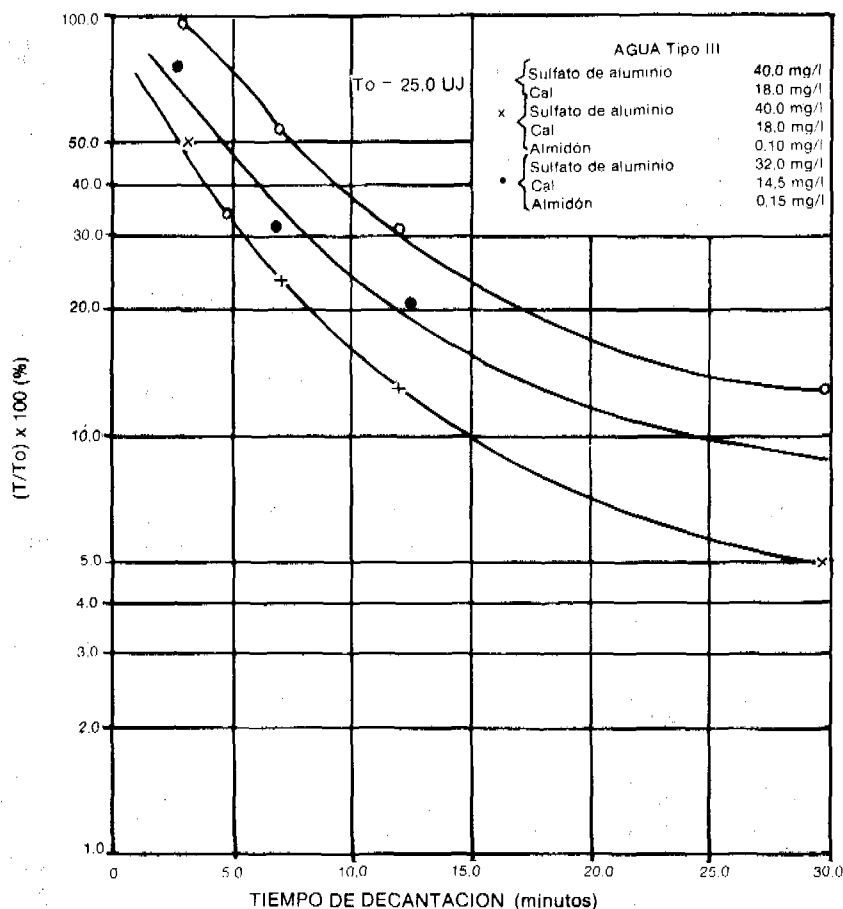


Fig. No. 4.7 Curvas de sedimentabilidad correspondientes a los resultados de algunos ensayos de floculación: Agua Tipo III.

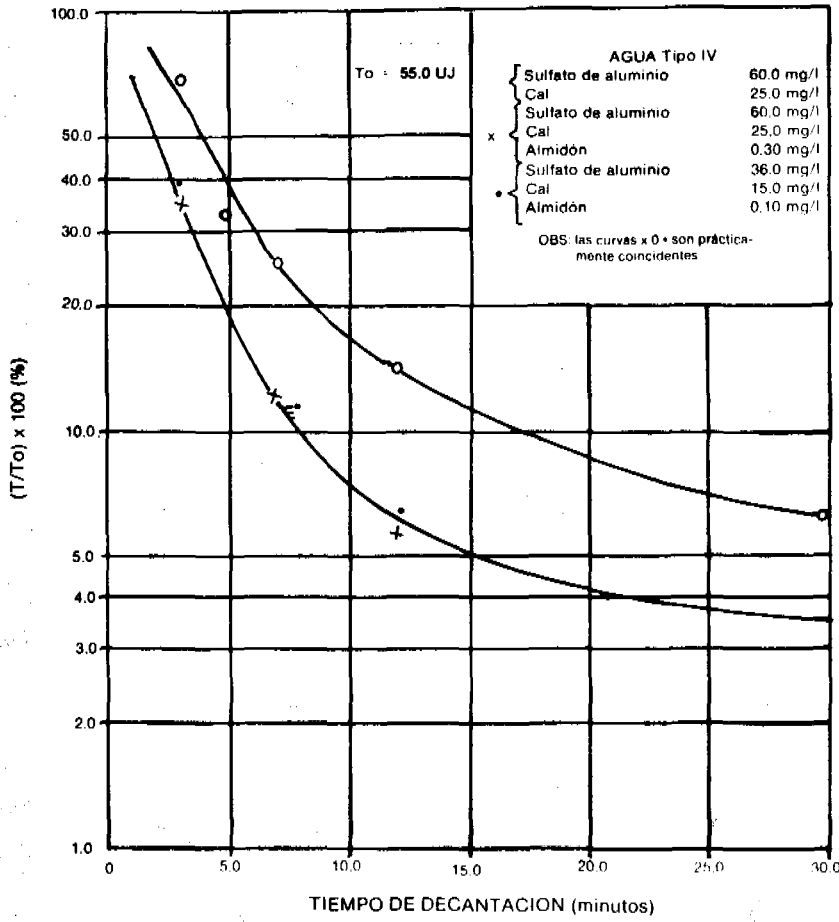


Fig. No. 4.8  
Curvas de sedimentabilidad correspondientes a los resultados de algunos ensayos de floculación: Agua Tipo IV.

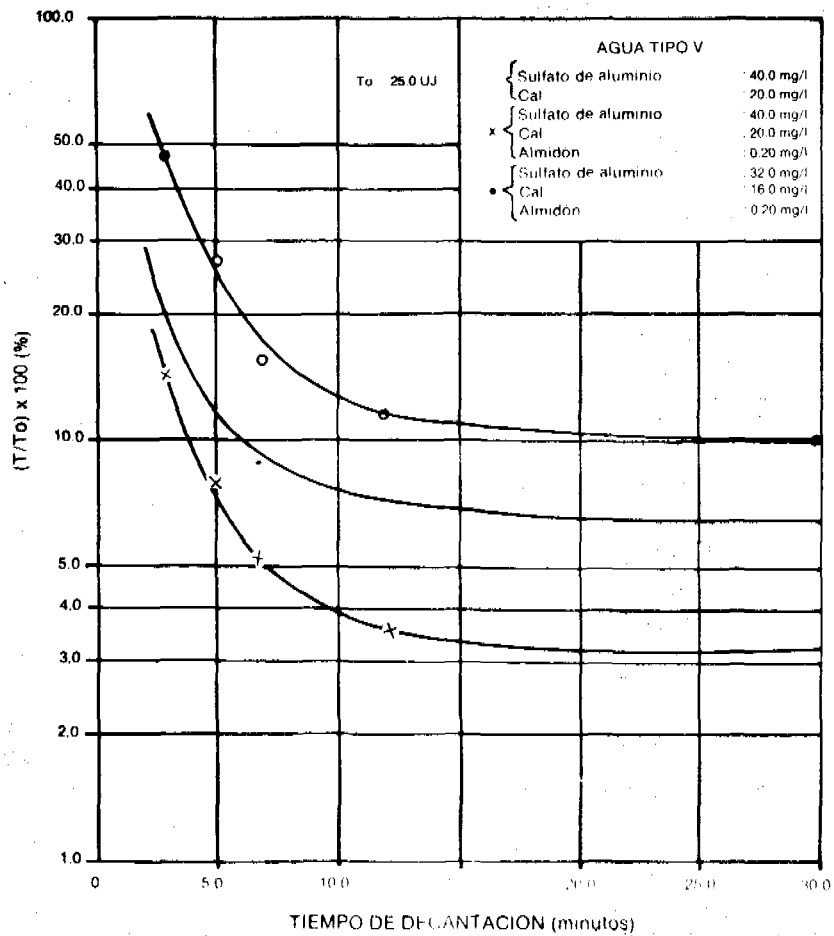


Fig. No. 4.9  
Curvas de sedimentabilidad correspondientes a los resultados de algunos ensayos de floculación: Agua Tipo V.

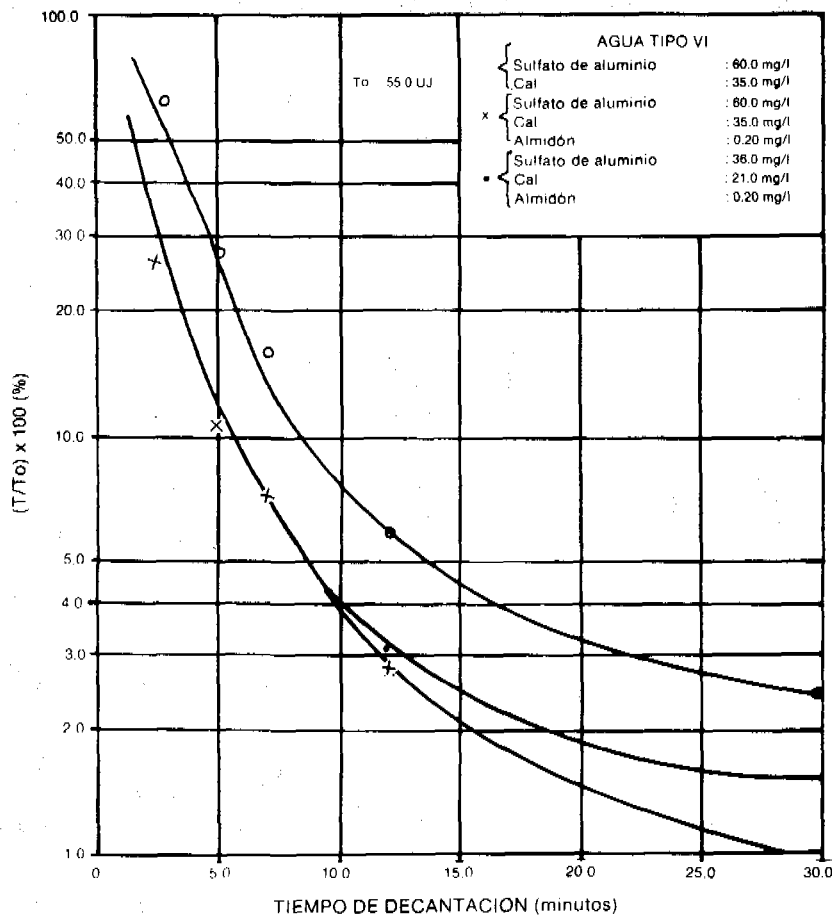


Fig. No. 4.10. Curvas de sedimentabilidad correspondientes a los resultados de algunos ensayos de floculación: Agua Tipo VI.

Los resultados presentados en las figuras no exigen mayor discusión, pues demuestran de manera evidente las ventajas del empleo del almidón como auxiliar de floculación.

Entre otros estudios, se juzgó interesante realizar ensayos con el objetivo de obtener datos para la determinación de las constantes de agregación ( $K_A$ ) y de ruptura ( $K_B$ ). Estas constantes se determinaron para cada una de las muestras estudiadas; las dosis de sulfato de aluminio y de cal se fijaron en 80% de las respectivas dosis óptimas, estimadas en ensayos preliminares, y la dosis de almidón aplicada en todos los reactores fue igual a 0.1 mg/l

En los ensayos realizados para obtener la información necesaria en la determinación de los valores de  $K_A$  y  $K_B$ , se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones:

- Gradiente de velocidad durante la mezcla rápida:  $300 \text{ s}^{-1}$ .
- Tiempo total de mezcla rápida: 120 s.
- Gradiente de velocidad durante la floculación: fueron aplicados gradientes de velocidad iguales a  $20 \text{ s}^{-1}$ ;  $30 \text{ s}^{-1}$ ;  $40 \text{ s}^{-1}$ ;  $50 \text{ s}^{-1}$ ;  $60 \text{ s}^{-1}$ ;  $90 \text{ s}^{-1}$  y  $120 \text{ s}^{-1}$  cada uno de estos valores corresponde a 1 (un) ensayo
- Tiempo total de floculación: 900 s
- Tiempo total de decantación: 900 s
- Profundidad de recolección de las muestras: 0.1 m
- Volumen de cada reactor: 2000 ml.
- Temperatura:  $19.0 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$

Para la evaluación de las constantes  $K_A$  y  $K_B$ , fueron utilizadas las ecuaciones propuestas por Hespagnol y Selleck<sup>(49)</sup>, las cuales se presentan a continuación.

$$\frac{N_F}{N_i} = 1 - e^{-K_c G} + e^{-K_A G T_d - K_c G} \quad (4.1)$$

$$K_c = \frac{K_B}{K_A} \quad (4.2)$$

$$\frac{N_F}{N_i} = \frac{T_F}{T_0} \quad (4.3)$$

donde:

- $N_i$  = Número inicial de partículas primarias por unidad de volumen
- $N_f$  = Número de partículas primarias por unidad de volumen, presentes en el sobrenadante
- $T_F$  = Turbiedad del sobrenadante (UT)
- $T_0$  = Turbiedad inicial de la muestra (UT)
- $K_A$  = Constante de agregación
- $K_B$  = Constante de ruptura (s)
- $K_c$  = Constante (s)
- $G$  = Gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ )
- $T_d$  = Tiempo de agitación, en este caso, igual a 900 s.

Es importante destacar que esta expresión es válida cuando la determinación de la turbiedad se efectúa después de agitar fuertemente la muestra, para obtener, fundamentalmente, partículas primarias en suspensión.

Para la evaluación de  $K_c$ , se empleó la ecuación 4.4, que corresponde a la primera derivada parcial de la ecuación (4.1), en el punto en que ocurre el valor máximo de  $N_i/N_f$ . El gradiente de velocidad asociado a esta condición está representado por el símbolo  $G^*$ .

$$K_c = \frac{K_A T_d e^{-K_A G^* T_d}}{1 - e^{-K_A G^* T_d}} \quad (4.4)$$

Los valores de las constantes correspondientes a las cuatro muestras estudiadas, se presentan en la Tabla No. 4.6, conjuntamente con los valores obtenidos por Hespanhol & Selleck (primera y segunda líneas del cuadro referido).

Los resultados verificados por estos investigadores fueron obtenidos con muestras de agua preparada, también empleando suspensión de caolinita. La primera línea del cuadro presenta los valores de  $K_A$  y  $K_B$ , determinados por Hespanhol & Selleck<sup>(49)</sup> con base en un ensayo en el cual se utilizó solamente sulfato de aluminio como coagulante; y la segunda línea corresponde a los resultados de un ensayo en el cual se empleó únicamente el polielectrolito catiónico Magnifloc 521-C (American Cyanamid Co., Stanford, Conn). En el primer caso, la muestra (muestra A), presentaba las siguientes características: Turbiedad inicial = 27.0 UJ; alcalinidad = 42.0 mg/l de  $CaCO_3$  y pH = 7.9. Se utilizó dosis de sulfato de aluminio igual a 20 mg/l. En el segundo caso, la muestra (muestra B), presentaba las siguientes características: turbiedad inicial = 27.0 UJ; alcalinidad = 41.0 mg/l de  $CaCO_3$  y pH = 5.5. La dosis de coagulante aplicado fue 3.0 mg/l.

Tabla No. 4.6 - Valores de las constantes  $K_A$ ,  $K_B$  y  $K_c$  <sup>(23)</sup>

MUESTRA	$K_A$	$K_B$ (s)	$K_c$ (s)
MUESTRA A	$9.40 \times 10^5$	$15.15 \times 10^8$	$1.61 \times 10^3$
MUESTRA B	$5.07 \times 10^5$	$7.80 \times 10^8$	$1.54 \times 10^3$
AGUA TIPO III	$7.40 \times 10^5$	$18.30 \times 10^8$	$2.47 \times 10^3$
AGUA TIPO IV	$9.39 \times 10^5$	$14.00 \times 10^8$	$1.49 \times 10^3$
AGUA TIPO V	$9.65 \times 10^5$	$11.05 \times 10^8$	$1.15 \times 10^3$
AGUA TIPO VI	$9.86 \times 10^5$	$6.68 \times 10^8$	$0.68 \times 10^3$

Con base en las observaciones efectuadas se concluye que, en la franja de valores de turbiedad y de alcalinidad estudiados, el empleo de almidón puede ser más eficiente para las muestras de mayor turbiedad; además, aparentemente, el aumento de alcalinidad es perjudicial para la floculación.

Los valores de  $K_A$  encontrados para las muestras estudiadas, de manera general, se aproximan más al valor correspondiente a la muestra A. Esto significa que la adición de almidón no interfiere de manera acentuada en las condiciones de agregación de las partículas, pues la muestra A fue floculada empleando únicamente sulfato de aluminio. Con relación a  $K_B$ , debe notarse el hecho de que el agua tipo VI presentó un valor relativamente pequeño, en comparación con los valores encontrados para las demás muestras. Esto significa que los flóculos obtenidos en la floculación del agua tipo VI son menos susceptibles a la ruptura que aquellos formados en los ensayos con las otras muestras.

En resumen, los ensayos de floculación de las muestras preparadas, presentaron los siguientes resultados:

- La utilización de almidón permitió la reducción en el consumo de sulfato de aluminio y de cal.
- Se presentaron valores más bajos de turbiedad del sobrenadante, tras la utilización del ayudante de floculación.
- El aumento de la alcalinidad aparente es perjudicial para la floculación, cuando se emplea el almidón de papa como ayudante de floculación.

## Ensayos de floculación con muestras de agua natural

### Ensayos con aguas naturales

Con el objetivo de probar la utilización del almidón de papa como auxiliar de floculación en las aguas naturales<sup>(23)</sup>, se ensayaron inicialmente ocho muestras, recolectadas en diferentes manantiales, en las proximidades de la ciudad de São Carlos, S.P., Brasil. En tres de estas muestras se adicionaron pequeñas cantidades de yodo y/o bicarbonato de sodio, de modo que fuera posible la obtención de aguas con valores más elevados de turbiedad y/o alcalinidad.

La Tabla No. 4.7 presenta la franja de valores estudiados para diversos parámetros de importancia en la floculación.

Tabla No. 4.7 - Intervalo de variación de las principales características de las muestras estudiadas

PARAMETRO	VALOR MINIMO	VALOR MAXIMO
Turbiedad (UJ)	10.0	86.0
Color (mg/l de Pt-Co)	40	200
pH	6.4	7.2
Alcalinidad (mg/l de CaCO <sub>3</sub> )	9.5	53.4
Potencial Zeta (mV)	-14.6	-27.6
Conductividad Especifica ( $\mu$ mho/cm)	18	100

Los resultados, en esta fase de la investigación, también fueron bastante favorables, pues, de las ocho muestras ensayadas, fue confirmada la aplicabilidad del almidón como auxiliar de floculación para 6 (seis) de ellas, considerando los aspectos relativos a costos y a calidad del sobrenadante.

La conclusión fue muy importante en esta ocasión, porque permitió acreditar la posibilidad del empleo de este polímero natural en un gran número de aguas provenientes de diversas fuentes superficiales.

### Ensayos con almidón de diferentes fuentes

Se presentan a continuación los resultados y conclusiones de la investigación realizada<sup>(25)</sup> con el objetivo de verificar la viabilidad del empleo de almidón de diversas fuentes naturales, como auxiliar de floculación.

El almidón utilizado en los ensayos de floculación fue pre-gelatinizado a través de dos métodos distintos. Algunos ensayos fueron efectuados con almidón pre-gelatinizado mediante calentamiento, y otros fueron efectuados con almidón pre-gelatinizado mediante adición de hidróxido de sodio, en frío.

Se utilizó almidón proveniente de cinco fuentes naturales distintas: papa, maíz, yuca, araruta y cará.

Inicialmente también se evaluó el almidón de arroz, pero los resultados fueron insatisfactorios.

Cada almidón se evaluó a través de ensayos de floculación con cuatro muestras distintas, que presentaban diferentes características de color, turbiedad, pH y alcalinidad.

Para el análisis de cada una de las muestras fue necesaria la ejecución de aproximadamente setenta ensayos de floculación ("jar-test") con el objetivo de conocer las dosis óptimas de sulfato de aluminio y de cal (cuando era necesaria), y la dosis más conveniente de almidón. También se realizaron ensayos especiales con el objetivo de verificar la influencia del gradiente de velocidad en la calidad del sobrenadante. Por lo tanto, las conclusiones presentadas en este trabajo están basadas en los resultados de cerca de 280 ensayos de floculación.

### Ensayos de floculación

Los ensayos de floculación, para cada muestra, se realizaron con el fin de caracterizar tres etapas distintas.

La primera etapa tenía como objetivo la determinación de las dosis óptimas de sulfato de aluminio y de cal (de ser necesaria), y también la dosis más conveniente de cada almidón evaluado.

En esta etapa se realizaron ensayos de floculación bajo las siguientes condiciones:

- Volumen de cada reactor: 2000 ml
- Gradiente de velocidad durante la mezcla rápida: 500 s<sup>-1</sup>
- Tiempo total de mezcla rápida: 180 s
- Gradiente de velocidad durante la floculación: 50 s<sup>-1</sup>

- Tiempo total de floculación: 900 s
- Tiempo de decantación: 900 s
- Profundidad de recolección de la muestra de sobrenadante en cada reactor: 0.1 m
- El hidróxido de calcio se adicionó aproximadamente 60 s antes del inicio del ensayo, directamente en los reactores, y durante este tiempo la muestra se agitó de modo que el gradiente de velocidad resultaba igual a  $500 \text{ s}^{-1}$ .
- El sulfato de aluminio era adicionado en el instante inicial del tiempo de mezcla.
- El almidón se adicionaba 60 s después de agregar el sulfato de aluminio.

Después de la determinación de las dosis óptimas de sulfato de aluminio y de cal (hidróxido de calcio), se realizaron ensayos de floculación con estas dosis pero con la adición de almidón como auxiliar de floculación. En el primer reactor no se adicionó almidón y en los otros reactores la dosis correspondió a los siguientes valores: 0.1 mg/l; 0.2 mg/l; 0.5 mg/l; 1 mg/l y 5 mg/l.

Como existía el interés de verificar las eventuales ventajas del empleo del almidón en lo que se refiere a la reducción del consumo de coagulantes primarios, se realizó otro ensayo, en el cual eran empleadas las mismas dosis de almidón de los ensayos anteriores, pero utilizando apenas 80% de los valores de las dosis óptimas de sulfato de aluminio y de cal, determinadas anteriormente.

La segunda etapa, consistía en ensayos de floculación realizados bajo las mismas condiciones de control ya descritas, pero variando el tiempo de sedimentación, con el objeto de comparar los resultados de sedimentabilidad de los flóculos, para las dosis que ofrecieran el sobrenadante de mejor calidad en los ensayos anteriores.

En estos ensayos, terminada la fase de floculación, se recolectaban muestras correspondientes a los siguientes valores de tiempo de decantación: 1 min, 4 min, 7 min, 12 min, 20 min y 30 min. Con los resultados de estos ensayos se construyeron curvas relacionando  $T_f/T_0$  (es decir, turbiedad final ( $T_f$ ) y turbiedad inicial ( $T_0$ )), con el tiempo de decantación.

En la tercera etapa se realizaron ensayos de floculación en los cuales se fijaba el tiempo de floculación y el tiempo de decantación, variando el gradiente de velocidad (floculación) desde  $30 \text{ s}^{-1}$  hasta  $140 \text{ s}^{-1}$ . Estos ensayos tenían como objetivo encontrar el gradiente de velocidad más adecuado para cada muestra de agua y para los productos utilizados en la floculación.

Evidentemente, el procedimiento descrito se seguía para cada muestra y para cada almidón evaluado.

## Muestras de agua

El agua utilizada en la ejecución de los ensayos era recolectada en una de las aducciones que alimentan la planta de tratamiento de la ciudad de São Carlos, S.P., Brasil.

Se utilizaron muestras que presentaban diferentes valores de color, pH, turbiedad y alcalinidad, con el objeto de obtener resultados más representativos.

En algunas muestras se adicionó bicarbonato de sodio y/o caolinita, con la finalidad de elevar los valores de alcalinidad y/o turbiedad de las mismas.

Las muestras de agua empleadas en esta investigación fueron denominadas: Agua Tipo VII, Agua Tipo VIII, Agua Tipo IX y Agua Tipo X, de acuerdo a los valores de sus parámetros más característicos.

**Agua Tipo VII:** Estas muestras eran recolectadas de la aducción antes mencionada y se empleaban en los ensayos sin modificar ninguna de sus características. Presentaban valores bajos de turbiedad y alcalinidad.

**Agua Tipo VIII:** Para la realización de los ensayos, se consideró conveniente disponer también de muestras que presentaran valores elevados de turbiedad. Para "producir" turbiedad se utilizó la caolinita (Kaolin K-3), de Fisher Scientific Company. Para la preparación de las muestras de Agua Tipo VIII, se siguieron estos pasos:

- Preparación de una suspensión, obtenida con la adición de 300.00 g de arcilla en 14.0 l de agua desionizada.
- Agitación de la suspensión durante 2 (dos) horas.
- Decantación durante un periodo de 10 (diez) horas.
- Sifonamiento del volumen de la suspensión, situado hasta 0.70 m del nivel inicial de la superficie líquida.
- Adición de un volumen de esta suspensión a muestras recolectadas en la mencionada aducción, hasta obtener el valor de turbiedad deseado.

**Agua Tipo IX:** Para la preparación de las muestras del Agua Tipo IX, se utilizó la misma fuente de recolección, pero, se empleó bicarbonato de sodio para "producir" alcalinidad. Se adicionaba la cantidad necesaria de bicarbonato de sodio, para obtener un valor deseado de alcalinidad.

**Agua Tipo X:** Para realizar los ensayos referentes al Agua Tipo X, las muestras también eran recolectadas en el mismo lugar descrito anteriormente, y se preparaban con el fin de obtener valores elevados de turbiedad y alcalinidad. Para "producir" turbiedad y alcalinidad, se adicionaban arcilla y bicarbonato de sodio, a las muestras en cuestión, de acuerdo con lo descrito para las muestras de Agua Tipo VIII y Tipo IX, respectivamente.

La Tabla No. 4.8 presenta la variación de los principales parámetros de las muestras utilizadas en este trabajo.

Tabla No. 4.8 Características de las muestras empleadas en los ensayos de floculación<sup>(25)</sup>

PARAMETRO MUESTRA	pH	TURBIEDAD (UT)	ALCALINIDAD (mg/l de CaCO <sub>3</sub> )	COLOR (mg/l de Pt-Co)
AGUA TIPO VII	6.20 a 6.50	6.5 a 8.9	8.8 a 9.0	20 a 40
AGUA TIPO VIII	5.70 a 6.40	110.0 a 150.0	3.3 a 14.6	> 70
AGUA TIPO IX	6.86 a 7.00	15.0 a 39.0	65.1 a 82.5	> 70
AGUA TIPO X	6.53 a 7.37	124.0 a 140.0	74.8 a 87.5	> 70

### Discusión de los resultados

Los resultados más importantes obtenidos para cada una de las cuatro muestras de agua estudiadas se presentan separadamente, pues las muestras escogidas tenían características muy diferentes, que influyen de manera decisiva en las condiciones de floculación, cuando se utiliza el almidón como auxiliar.

En total se realizaron aproximadamente 280 ensayos de floculación, pero se destacarán apenas los resultados de aquellos en los cuales se verificó la sedimentabilidad de los flóculos. En estos ensayos se comparaba la sedimentabilidad de los flóculos resultantes de la utilización de dosis del coagulante primario y del auxiliar que ofrecieran un sobrenadante de mejores características, para cada almidón evaluado y para cada muestra de agua. Con el fin de simplificar la presentación de los resultados se adoptaron las abreviaturas AGEF y AGECE, que significan, respectivamente: almidón gelatinizado en frío, con la utilización de hidróxido de sodio; y almidón gelatinizado en caliente, a través de calentamiento de la dispersión acuosa.

*Agua Tipo VII.* Las muestras clasificadas como Agua Tipo VII presentaban valores bajos de turbiedad, color y alcalinidad de los almidones.

La utilización de los almidones de maíz y yuca no influyó sensiblemente en la calidad del sobrenadante, cuando se empleó el AGEF. Por el contrario, cuando se utilizó almidón de papa, de araruta y de cará, fue posible una reducción del 20% en la dosis de coagulante primario, obteniéndose un sobrenadante de mejor calidad que el conseguido con el uso de sulfato de aluminio y cal, únicamente.

Cuando se utilizó el AGECE, los resultados obtenidos fueron un poco mejores que los correspondientes al AGEF, cuando se empleó conjuntamente con sulfato de aluminio y cal en sus dosis óptimas, sin embargo no se comprobó la posibilidad de reducción del 20% del consumo de estos productos.

Para las muestras de Agua Tipo VIII, al efectuarse la pre-gelatinización con adición de hidróxido de sodio, se obtuvo una mayor eficiencia al utilizar almidón de araruta, y, para el almidón pre-gelatinizado por calentamiento, los mejores resultados se lograron con los almidones de araruta y cará.

Las Figuras Nos. 4.11 y 4.12 permiten observar los resultados de los ensayos correspondientes a estas dos alternativas.

*Agua Tipo VIII.* Las muestras clasificadas como Agua Tipo VIII, presentaban valores elevados de turbiedad y color, pero relativamente bajos de alcalinidad.

Los ensayos de floculación efectuados con el AGEF, sólo presentaron resultados favorables cuando se utilizó almidón de yuca y almidón de maíz; sin embargo, la eficiencia del primero fue sensiblemente superior a la del segundo.

La Figura No. 4.13 muestra la ventaja de utilizar el almidón de yuca, inclusive en el caso para el cual se efectuó una reducción del 20% en las dosis de sulfato de aluminio y cal.

Cuando se empleó el AGECE, todos los resultados fueron favorables, con excepción de los correspondientes al almidón de maíz. El almidón que presentó el mejor comportamiento fue el de araruta.

La Figura No. 4.14 presenta las curvas obtenidas en los ensayos de floculación con almidón de araruta, los cuales demostraron que los resultados de la utilización de este polímero, conjuntamente con las dosis de coagulantes primarios correspondientes al 80% de sus dosis óptimas, ofrecen sobrenadante de mejor calidad que el obtenido en el caso del empleo de las dosis óptimas asociadas a la adición de almidón.

*Agua Tipo IX.* Las muestras de Agua Tipo IX presentaban valores bajos de turbiedad y valores elevados de alcalinidad y color.

El almidón gelatinizado con hidróxido de sodio no mostró ventajas cuando se utilizó con el objetivo de conseguir una sensible mejoría en la calidad del sobrenadante, sin embargo se evidenció la



posibilidad de reducir el consumo de coagulante primario, justificándose su empleo, en este caso, como un medio para reducir costos.

La Figura No. 4.15 muestra los resultados obtenidos con el almidón de papa. Estas curvas pueden ser consideradas típicas para el almidón de otras fuentes.

Cuando se utilizó el AGECC, se comprobó que es posible la reducción del 20% en el consumo de coagulante primario y, además, se obtuvo un sobrenadante de mejor calidad que el obtenido cuando sólo se utiliza coagulante o cuando se utiliza la dosis óptima de coagulante primario con una determinada dosis del almidón en referencia.

En la Figura No. 4.16 se presentan las curvas obtenidas para el almidón de papa.

Agua Tipo X. Las muestras de Agua Tipo X, presentaban valores elevados de turbiedad, color y alcalinidad.

Para estas muestras, el almidón de todas las fuentes ofreció buenos resultados. En general, se consiguió una reducción del 20% en el consumo de sulfato de aluminio y la calidad del sobrenadante a pesar de esto resultó mejor o igual a la presentada cuando se utilizó solamente coagulante primario, o cuando se utilizó la dosis óptima de coagulante primario con la dosis escogida de almidón.

Los mejores resultados correspondientes al AGECC, se obtuvieron con el empleo de los almidones de cará y de araruta.

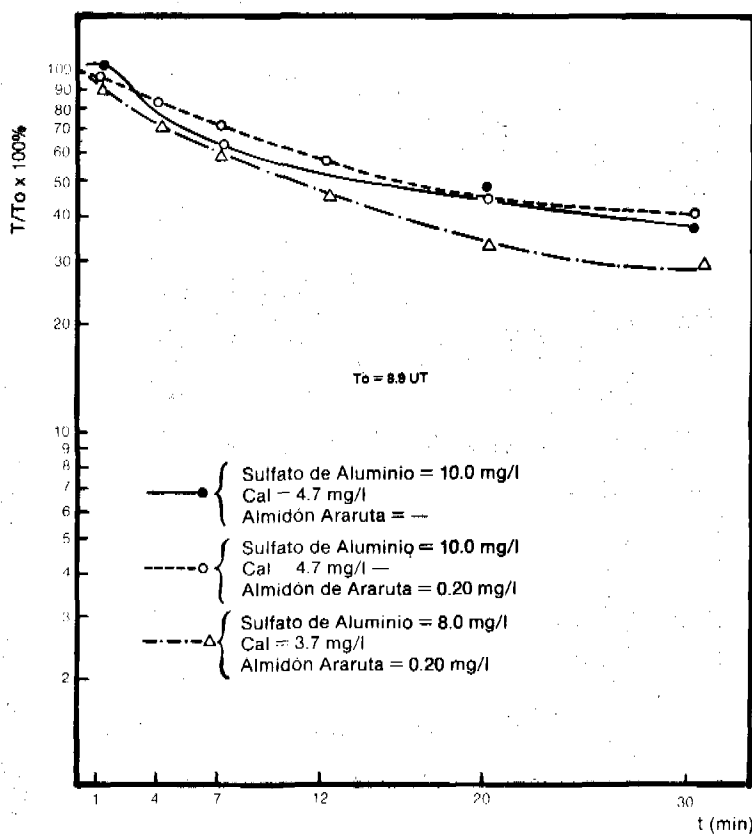


Fig. No. 4.11 - Curvas de sedimentabilidad: almidón de araruta gelatinizado con hidróxido de sodio. Agua Tipo VII.

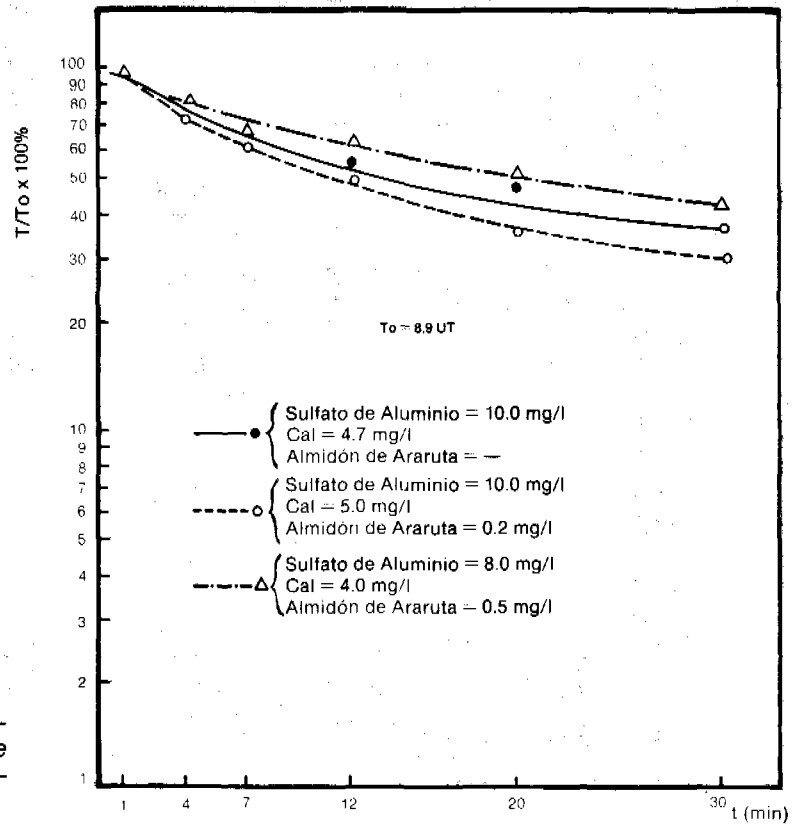


Fig. No. 4.12 - Curvas de sedimentabilidad: almidón de araruta gelatinizado en caliente. Agua Tipo VII.

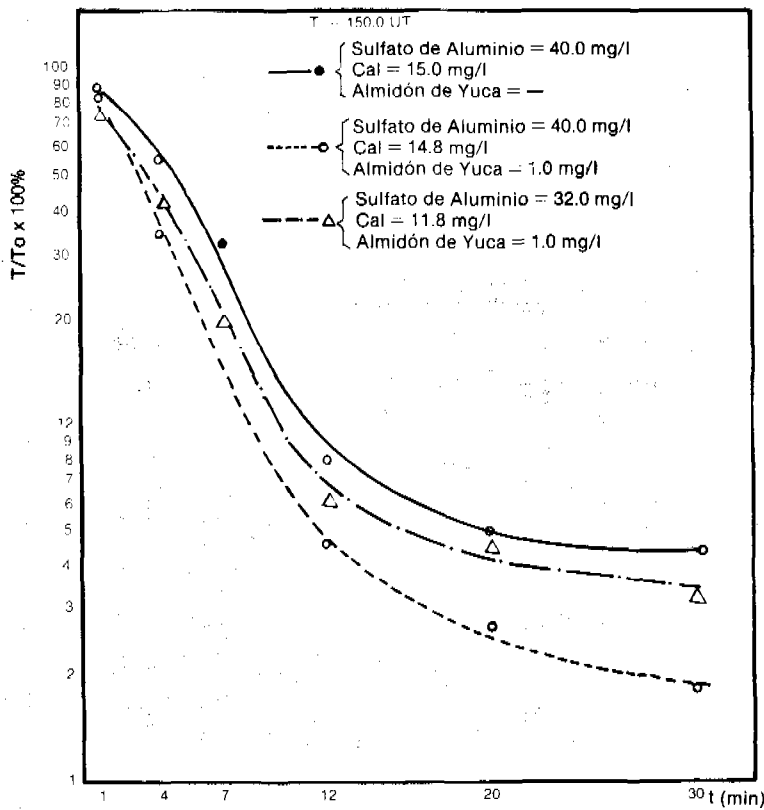


Fig. No. 4.13 - Curvas de sedimentabilidad: almidón de yuca gelatinizado con hidróxido de sodio. Agua Tipo VIII.

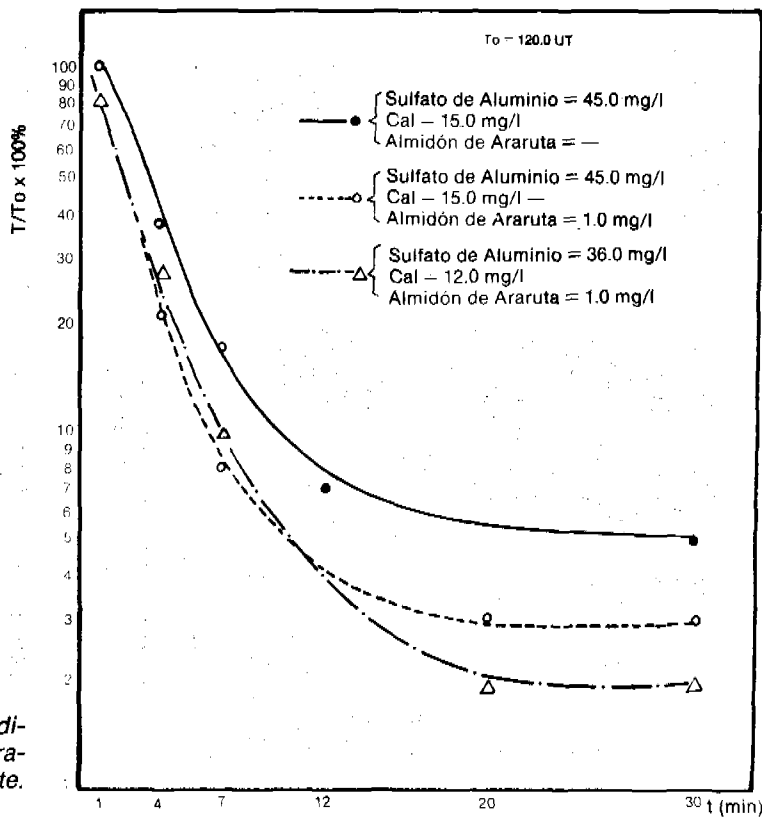


Fig. No. 4.14 - Curvas de sedimentabilidad: almidón de araruta gelatinizado en caliente. Agua Tipo VIII.

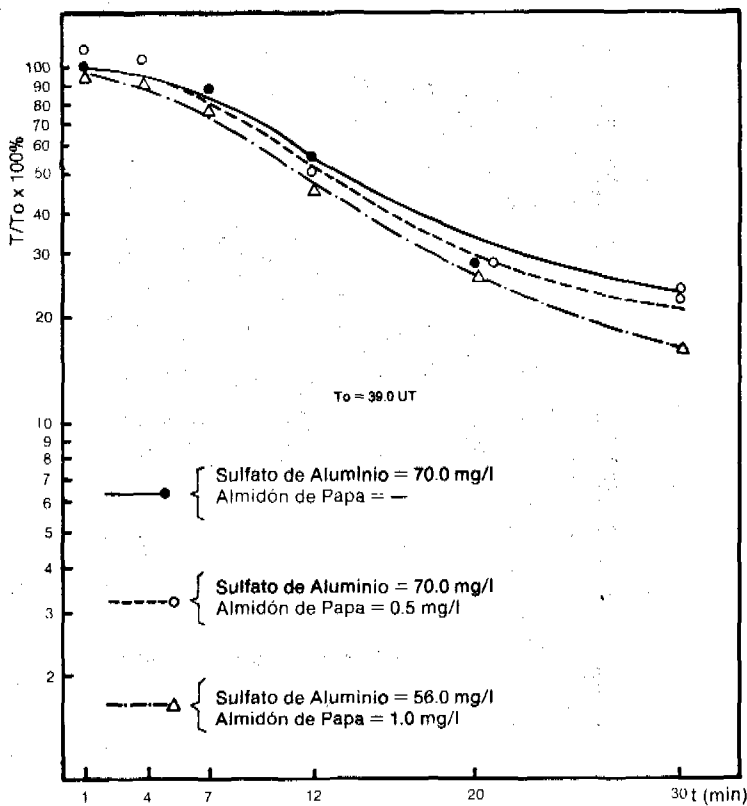


Fig. No. 4.15 - Curvas de sedimentabilidad: almidón de papa gelatinizado con hidróxido de sodio. Agua Tipo IX.

Fig. No. 4.16  
Curvas de sedimentabilidad: almidón de papa gelatinizado en caliente. Agua Tipo IX.

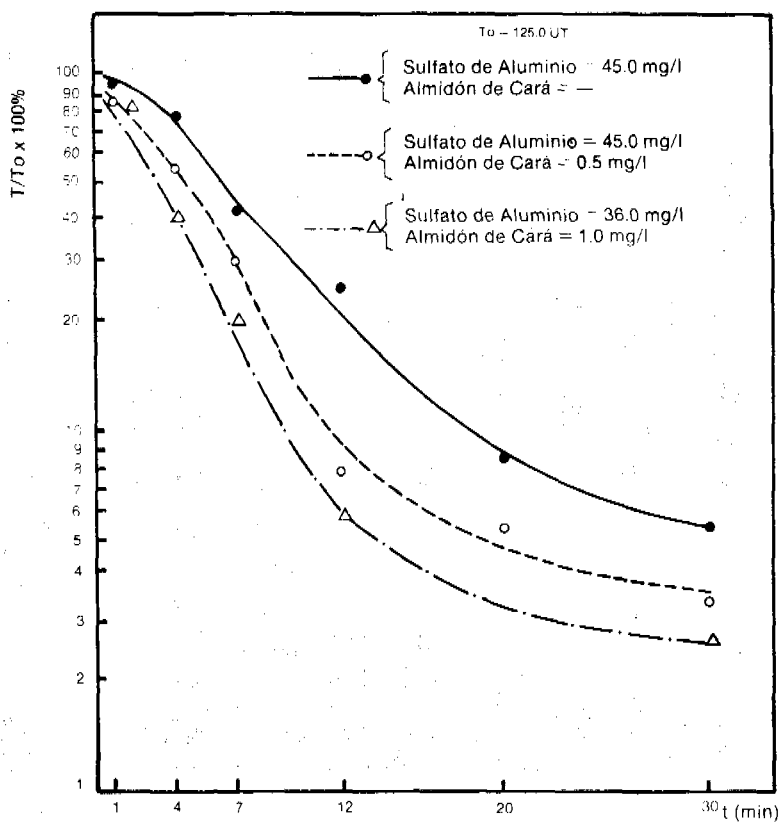
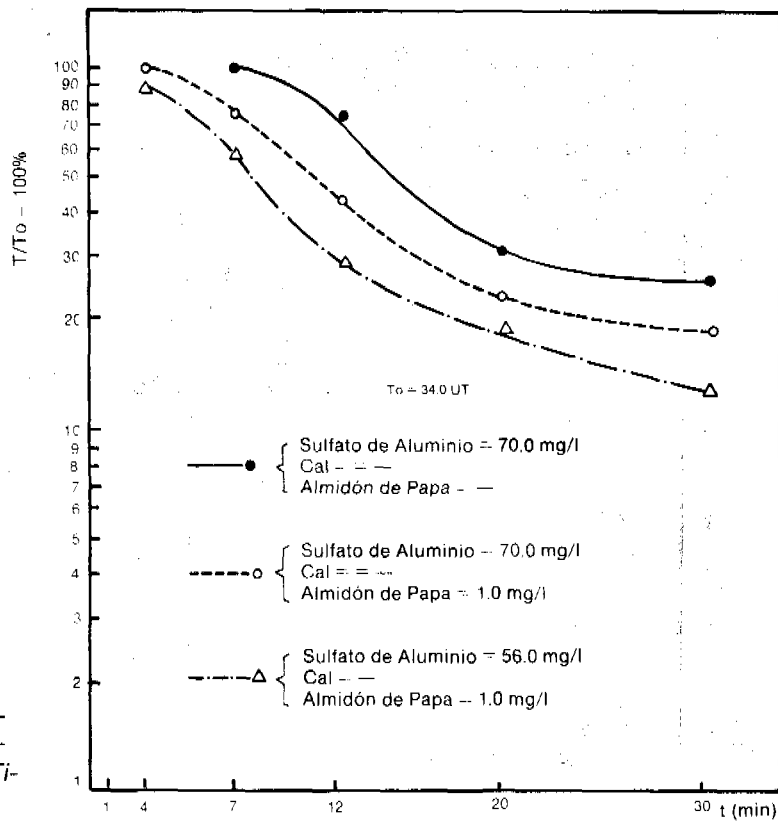


Fig. No. 4.17  
Curvas de sedimentabilidad: almidón de cará gelatinizado con hidróxido de sodio. Agua Tipo X.

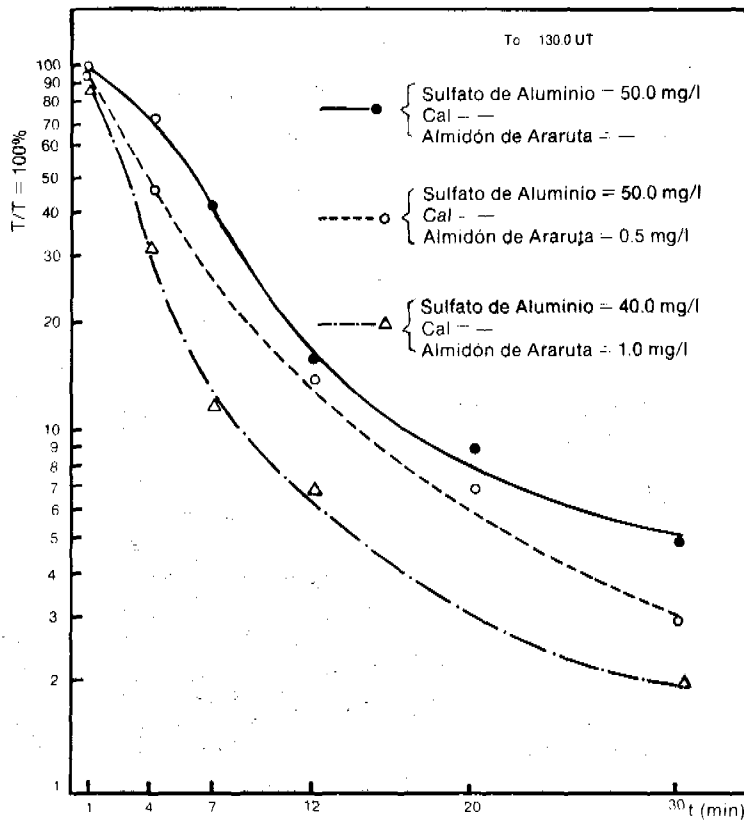


Fig. No. 4.18 - Curvas de sedimentabilidad: almidón de araruta gelatinizado en caliente. Agua Tipo X.

Cuando se utilizó el AGECE, los resultados fueron un poco mejores. También en este caso el mejor comportamiento se obtuvo con los almidones de cará y araruta.

Las Figuras Nos. 4.17 y 4.18, muestran las curvas de sedimentabilidad referentes a ensayos en los cuales se empleó almidón de cará (AGEF) y araruta (AGEC).

La Tabla No. 4.9 indica las fuentes cuyo almidón presentó los mejores resultados para las muestras de agua estudiadas.

Tabla No. 4.9 - Resumen de los mejores resultados<sup>(25)</sup>

MUESTRAS	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES			MEJORES RESULTADOS	
	TURBIEDAD (UT)	COLOR (mg/l de Pt-Co)	ALCALINIDAD (mg/l de CaCO <sub>3</sub> )	AGEF	AGEC
AGUA TIPO VII	6.5 a 8.9	20 a 40	8.8 a 9.0	Araruta	Cará y Araruta
AGUA TIPO VIII	110.0 a 150.0	70	3.3 a 14.6	Maíz y Yuca	Cará, Araruta, y Papa
AGUA TIPO IX	15.0 a 39.0	70	65.1 a 82.5	Papa y Maíz	Papa y Araruta
AGUA TIPO X	124.0 a 140.0	70	74.8 a 87.5	Cará y Araruta	Cará y Araruta

Los resultados correspondientes a los ensayos realizados en la tercera etapa de las evaluaciones efectuadas con cada muestra de agua y con cada almidón, demostraron que, generalmente, el gradiente óptimo para la floculación del agua, empleando únicamente sulfato de aluminio y cal, es aproximadamente igual al gradiente óptimo obtenido cuando se utiliza el almidón como auxiliar, para la misma agua.

-El almidón pregelatinizado en frío, utilizando hidróxido de sodio, y el almidón pregelatinizado por calentamiento de la dispersión acuosa, presentan posibilidades de ser utilizados como auxiliares de floculación.

-Para las muestras estudiadas, generalmente el almidón pregelatinizado por medio de calentamiento, presentó resultados ligeramente mejores que los del almidón pregelatinizado en frío. Sin embargo, teniendo en cuenta las mayores facilidades para efectuar la pregelatinización en frío, en la práctica, esta alternativa debe ser considerada siempre en las plantas de tratamiento.

-Considerando las muestras evaluadas, siempre fue posible escoger almidón de alguna fuente que hiciera viable su utilización como auxiliar de floculación. De acuerdo con lo anterior, es conveniente que en las investigaciones que se realicen con el objetivo de estudiar la aplicabilidad del almidón, como auxiliar de floculación en plantas de tratamiento, se evalúe el almidón de todas las fuentes disponibles en la región, para escoger la alternativa que ofrezca los mejores resultados técnicos y económicos.

-En general, los resultados obtenidos con la utilización del almidón como auxiliar de floculación demuestran que existe una mayor posibilidad de éxito, cuando esta técnica se emplea en el tratamiento de aguas que presenten características semejantes a las del Agua Tipo VIII y Agua Tipo X, ambas con valores de turbiedad relativamente altos. Sin embargo, este hecho no elimina la posibilidad de emplearlo para aguas semejantes a las otras muestras evaluadas (Agua Tipo VII y Agua Tipo IX), principalmente en lo que se refiere a la reducción de gastos de coagulantes primarios.

-Aparentemente, la eficiencia del almidón como auxiliar de floculación está mucho más relacionada con los valores de turbiedad, que con los valores de alcalinidad del agua en cuestión.

-En algunos ensayos se comprobó que la utilización de almidón permitió la reducción de color del sobrenadante, en comparación con la remoción de color obtenida cuando éste no era usado como auxiliar.

-El gradiente óptimo de velocidad, para la floculación, empleando almidón como auxiliar, es aproximadamente igual al gradiente óptimo para la floculación de la misma agua, cuando se utiliza únicamente sulfato de aluminio y cal. Esta información permite concluir que, en las plantas de tratamiento donde los valores de gradiente de velocidad en las unidades de floculación son apropiados para el tratamiento con sulfato de aluminio y cal, no es necesario efectuar ninguna alteración en caso de que se quiera emplear el almidón como auxiliar.

#### **4.2.2.2 Algunos estudios de laboratorio conducentes a la obtención de recursos para el proyecto de reforma de plantas de tratamiento (PT).**

##### **Ensayos realizados con muestras de manantial en la ciudad de Taubaté (Planta de Tratamiento II) SP Brasil**

Se estudiaron dos muestras<sup>(38)</sup>, una de ellas recolectada a la llegada de la aducción a la planta de tratamiento (turbiedad: 280 UT), y otra, preparada con agua de manantial, enturbiaada con una pequeña porción de lodo de su fondo, hasta alcanzar valores de turbiedad, alcalinidad y color del orden de los que se presentan en ocasiones de lluvias intensas (turbiedad: 740 UT).

Se realizaron varios ensayos con el fin de obtener información acerca de las condiciones de funcionamiento de la planta de tratamiento y la obtención de datos para definir la ampliación y reforma de las instalaciones. En el presente documento sólo se consideran las principales conclusiones relacionadas con el empleo de almidón como auxiliar de floculación.

En este estudio fueron empleados, además del sulfato de aluminio, como coagulante primario, los almidones de papa y de araruta y diversos polímeros sintéticos comerciales, como auxiliares de floculación.

Las Figuras Nos. 4.19 y 4.20 muestran, fundamentalmente, el resumen de las conclusiones acerca de la investigación efectuada.

En la Figura No. 4.19 se presentan las curvas correspondientes a los ensayos para los cuales se aplicó la dosis óptima de sulfato de aluminio sin la utilización de auxiliar y, también, ensayos con la dosis óptima de sulfato de aluminio conjuntamente con la aplicación de almidón de araruta y de un polímero comercial.

Se nota que el efecto de la utilización de almidón fue bastante favorable, sin embargo, el polímero comercial ofrece resultados un poco mejores.

La Figura No. 4.20 presenta las curvas correspondientes a los ensayos para los cuales se aplicó una dosis de sulfato de aluminio igual al 80% de la dosis óptima. En esta figura, también puede observarse la influencia de la utilización de los polímeros indicados en la Figura No. 4.19. En este caso,

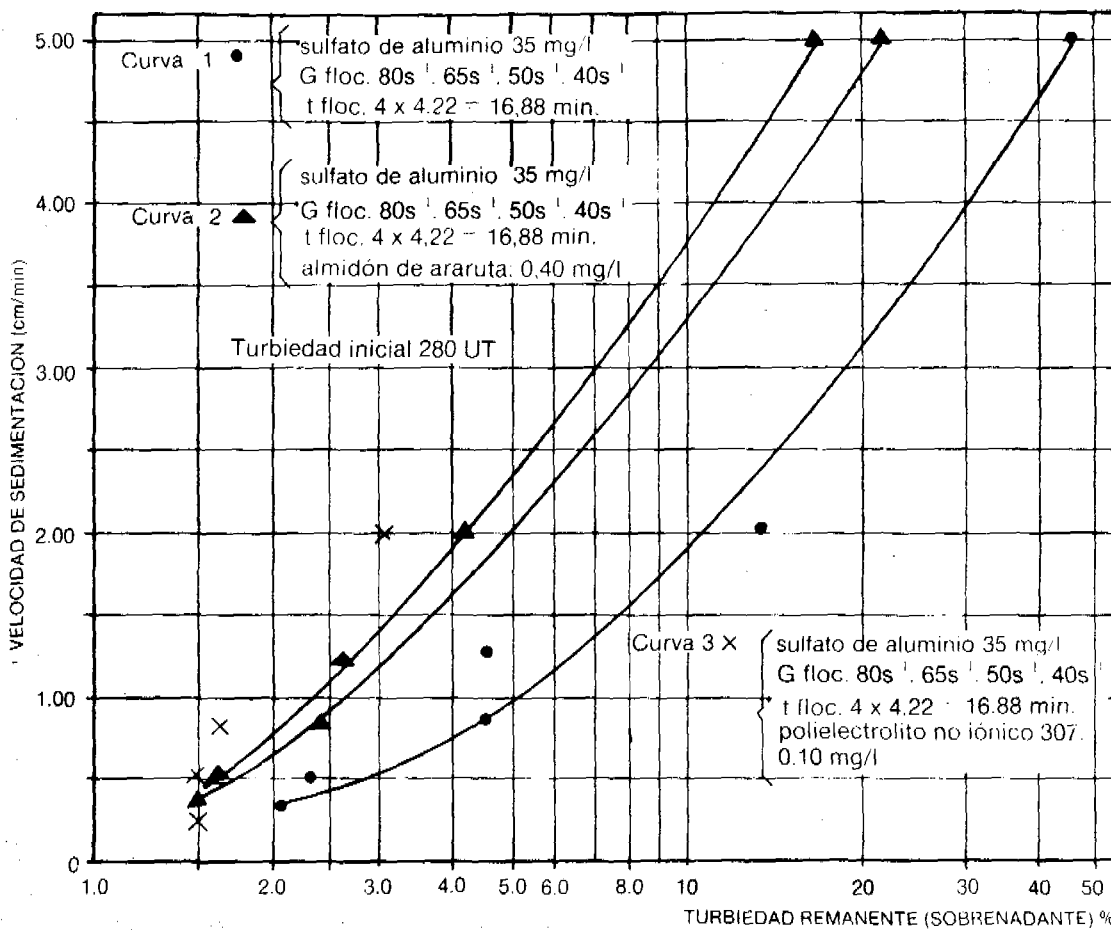


Fig. No. 4.19 - Curvas de sedimentación en función de turbiedad remanente utilizando diferentes polímeros.  
Dosis de sulfato de aluminio: 35 mg/l<sup>(18)</sup>

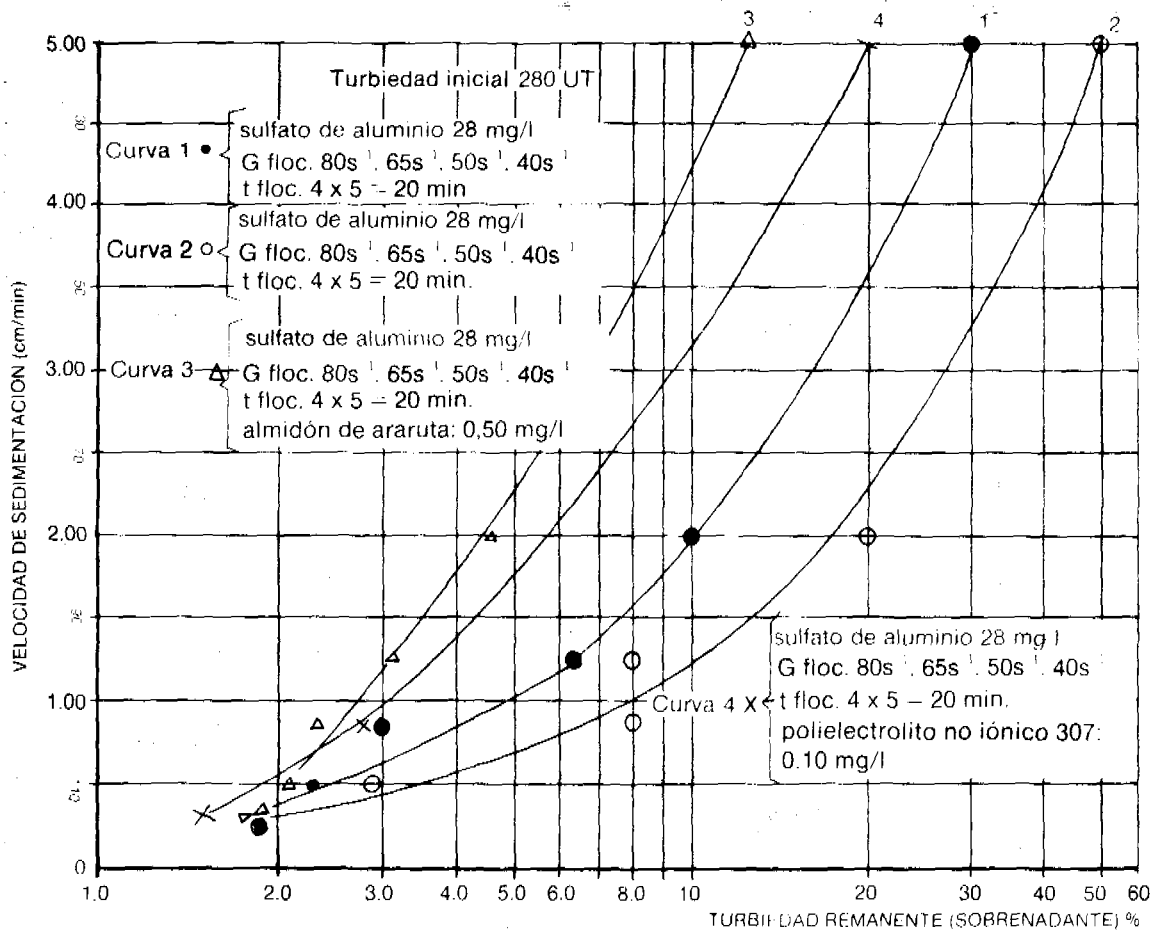


Fig. No. 4.20 - Curvas de sedimentación en función de la turbiedad remanente utilizando diferentes polímeros.  
Dosis de sulfato de aluminio: 28 mg/l<sup>(18)</sup>

sin embargo, el almidón de araruta ofrece mejores resultados como ayudante de floculación que el polímero comercial.

Se comprobó, en el estudio, que la utilización del almidón, además de mejorar la calidad del agua tratada, trae como consecuencia la reducción del volumen de lodo producido y la reducción de costos de productos químicos, para las dos muestras estudiadas.

El agua cruda utilizada en estos ensayos tiene las características presentadas en la Tabla No. 4.10.

**Tabla No. 4.10 - Principales características de las muestras estudiadas (Taubaté - SP - Brasil)<sup>(38)</sup>**

PARAMETRO	MUESTRA XI	MUESTRA XII
Turbiedad (UT)	280	740
Color aparente (mg/l de Pt Co)	600	3.000
pH	7.0 ± 0.2	7.2 ± 0.1
Alcalinidad (mg/l de Ca CO <sub>3</sub> )	28 ± 2	31

**Ensayos realizados con muestras de manantial de la ciudad de Presidente Prudente, S.P., Brasil<sup>(37)</sup>**

En este caso se emplearon también dos muestras para los ensayos de floculación<sup>(37)</sup>, cuyas características se presentan en la Tabla No. 4.11.

**Tabla No. 4.11 - Principales características de las muestras estudiadas (Presidente Prudente, S.P., Brasil)**

PARAMETRO	MUESTRA XIII	MUESTRA XIV
Turbiedad (UT)	95	9.5
Color aparente (mg/l de Pt Co)	400	20
pH	7.5	7.50
Alcalinidad (mg/l de Ca CO <sub>3</sub> )	132	134
Dureza total (mg/l de Ca CO <sub>3</sub> )	120	120
Nitrógeno Comercial (mg/l)	0.17	0.17
Hierro total (mg/l)	0.64	0.59
DQO (mg/l)	33	40
NTK (mg/l)	1.2	1.0
Fósforo total (mg/l)	2.39	0.15

Los ensayos realizados tuvieron los mismos objetivos descritos para la planta de tratamiento de Taubaté S.P., pero se evaluaron los siguientes productos:

Sulfato de aluminio

Cloruro férrico

Acido sulfúrico (0.1 N)

Almidón de papa

Almidón de araruta

Polielectrolito catiónico aquatic - D 10

Polielectrolito aniónico aquatic - M 13

Como en el caso anterior, serán considerados en forma somera los resultados finales de los ensayos en los cuales se utilizó el almidón como auxiliar.

El coagulante primario que ofreció los mejores resultados fue el sulfato de aluminio; y la utilización de dosis entre 0.6 y 1.2 mg/l de almidón de papa, llevó a la obtención de flóculos densos, con una menor producción de lodo y una notable mejoría en la remoción de turbiedad.

Con relación a la eficiencia en la remoción de turbiedad, se llegó a valores superiores al 90% para una carga superficial de hasta 72 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> día, con una dosis de 1.2 mg/l de almidón.

La Figura No. 4.21 presenta algunas curvas construidas empleando la dosis óptima de sulfato de aluminio y diferentes dosis de almidón de papa, el cual ofreció mejores resultados que el almidón de araruta.



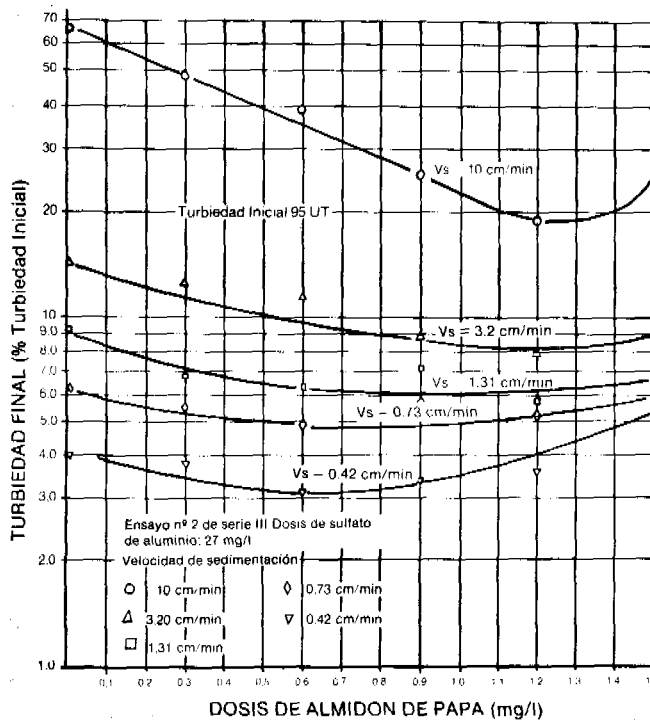


Fig. No. 4.21 - Eficiencia de remoción de la turbiedad en función de la dosis de almidón de papa.<sup>(37)</sup>

## 4.2.3 Ensayos en plantas de tratamiento

### 4.2.3.1 Introducción

Actualmente, varias plantas de tratamiento han venido probando la aplicación del almidón como auxiliar de floculación y, en algunas ciudades, esta técnica ha sido incorporada como una labor de rutina en el proceso de tratamiento del agua. Entre estas ciudades se pueden citar: Araraquara, S. P. (Brasil); São Carlos, S.P. (Brasil); Rondonópolis, Mato Grosso (Brasil) y Guayaquil (Ecuador).

La primera planta de tratamiento de agua que utilizó almidón como ayudante de floculación en el Brasil, fue la ciudad de São Carlos<sup>(23)</sup>; sus resultados serán presentados a continuación.

Antes de presentar los ensayos realizados en esta ciudad, se hará una breve descripción de la metodología que se debe seguir, cuando se quieran realizar experiencias en plantas de tratamiento, utilizando una solución de almidón como ayudante de floculación.

### 4.2.3.2 Criterios para la preparación y aplicación del almidón en los periodos de ensayo<sup>(24)</sup>

a) Estimativo del consumo diario de almidón e hidróxido de sodio.

Generalmente, la dosis de almidón que produce resultados satisfactorios, varía entre 0.1 y 1.5 mg/l, de acuerdo con lo descrito anteriormente. Es así como, por ejemplo, en una planta de tratamiento de agua con una capacidad igual a 10.000 m<sup>3</sup>/día, el consumo estimado de almidón puede variar entre 1 y 15 kg/día. Si se considera el hidróxido de sodio (soda cáustica) para gelatinizar el almidón, la proporción, en peso, es del orden de 1:5 ó 1:4. De acuerdo con esta proporción, para el consumo de almidón anteriormente estimado, el consumo de soda cáustica puede variar entre 0.25 y 3.5 kg/día, aproximadamente. Es evidente que los valores aquí presentados son aproximados, debiéndose en cada caso, obtener las cantidades de almidón y de soda cáustica que permitan lograr resultados deseables, mediante una aplicación continua en la planta de tratamiento que se va a estudiar.

b) Concentración del almidón en los tanques de preparación.

Como unidad provisional (para una prueba preliminar) en la preparación y dosificación de la suspensión de almidón, se puede contar, por ejemplo, con dos tanques de 1 m<sup>3</sup>. En función de la capacidad de la planta, se puede estimar el tiempo de operación de cada tanque, tomando como base una concentración máxima del 1.5% (15 g de almidón por litro de suspensión). Si en algún caso es necesario el uso de una concentración superior al 1.5%, se deben efectuar pruebas específicas, con el fin de verificar si la viscosidad de la solución no resulta excesiva para el equipo de dosificación instalado.

En el ejemplo citado, para una planta de tratamiento con capacidad de 10.000 m<sup>3</sup>/día, se tendría:

- Consumo de almidón: 1 kg/día (mínimo)  
Volumen diario de solución: 66.7 litros, con una concentración del 1.5%
- Consumo de almidón: 15 kg/día (máximo)  
Volumen diario de solución: 1000 litros, con una concentración del 1.5%.

En ambos casos, se podría reducir la concentración en los tanques de preparación, puesto que la instalación provisional cuenta con dos tanques de 1000 litros, de acuerdo con lo establecido anteriormente.

Para plantas de tratamiento con capacidad superior, se pueden plantear dos alternativas: 1a.) aumentar la concentración de almidón; 2a.) aumentar el número de veces en que la suspensión se prepara durante un día, es decir, reducir el tiempo de funcionamiento de los tanques de preparación. En el primer caso, resultan algunos inconvenientes relacionados con el aumento de viscosidad de la suspensión; en la segunda alternativa, se requiere de una mayor atención por parte de los investigadores, pues mientras el contenido de un tanque se está utilizando, la suspensión se debe estar preparando en el otro tanque.

Es conveniente resaltar que la dosis de 1.5 mg/l es considerada substancialmente elevada, si se comparan los resultados encontrados en un gran número de trabajos de investigación realizados en la Escuela de Ingeniería de São Carlos.

c) Gelatinización del almidón

Esta operación ya fue descrita en el ítem anterior.

d) Aplicación de la suspensión de almidón para floculación-sedimentación.

Considerando que la planta de tratamiento se encuentra en condiciones normales de operación, la aplicación de la suspensión de almidón deberá iniciarse con una dosis del orden de 0.5 mg/l.

El punto de aplicación debe ser obtenido por ensayo y error, pues depende del tipo de sistema de floculación existente en cada planta. Utilizando una manguera flexible, se estudiará la posición que produzca los mejores resultados; se recomienda iniciar con una aplicación un poco después de la mezcla rápida. Cualquiera que sea el punto de aplicación de la suspensión de almidón, la dispersión de la solución puede obtenerse por medio de una canaleta con orificios.

Los primeros resultados se pueden observar algunas horas después del inicio de la adición del almidón, sin embargo, como se pretende realizar un trabajo de investigación que permita obtener resultados concluyentes y confiables, esta dosis se mantendrá por un período de cuatro días, durante los cuales se recogerán muestras cada cuatro horas, en los siguientes puntos: llegada del agua cruda; salida de la unidad de floculación; salida de los decantadores y salida de los filtros.

Con la muestra de agua floculada, puesta en un cono Imhoff, se determinará el volumen de lodo producido, mediante lecturas en los siguientes tiempos: 5 min, 30 min, 60 min, 1 h, 3.0 h, 4.0 h.

Con las demás muestras se realizarán las siguientes determinaciones: pH, color aparente y verdadero, turbiedad y alcalinidad. Un volumen de aproximadamente 100 ml de cada muestra será filtrado en papel Whatman 40; al efluente filtrado se le determinará turbiedad y color.

Paralelamente, el operador debe anotar, por separado, la frecuencia de lavado de los filtros, durante el período de aplicación del almidón; además, tomará nota de la evolución de la pérdida de carga en estas unidades durante dicho período.

Para poder efectuar comparaciones con una operación sin el empleo de almidón, se recomienda registrar las medidas de las características anteriormente mencionadas (en el agua cruda, decantada y filtrada) por un período mínimo de dos semanas anteriores al inicio de la aplicación del almidón.

Después de los cuatro días iniciales de aplicación continua de la dosis de 0.50 mg/l, se debe modificar esta dosis de polímero. Se recomienda incrementarla a valores de 0.8, 1.2 y 1.5 mg/l, y reducirla a 0.25 y 0.10 mg/l. La aplicación de cada dosis debe ser hecha por un período de dos días, durante los cuales se recogerán muestras y se analizarán sus características. El análisis de los resultados obtenidos permitirá definir la dosis óptima.

Una vez seleccionada la dosis óptima de almidón, se estudiará la reducción de la dosis de coagulante primario. Con base en los estudios desarrollados en la EESC-USP, se pueden conseguir reducciones de coagulante primario entre el 20% y el 60%, siendo mayor la reducción, cuando el agua cruda presenta turbiedad muy elevada y color verdadero relativamente bajo. Se considera un caso más complejo, cuando la cal se usa para ajustar el pH óptimo de floculación, en este caso la dosis de este producto debe ser reducida de modo tal que el pH de floculación no se altere significativamente.

De acuerdo con la calidad del agua cruda (turbiedad, color y alcalinidad), se definen las dosis óptimas de coagulante y alcalinizante (si es necesario) con base en los datos del registro de operación de la planta de tratamiento. Se recomienda, inicialmente, una reducción del 20% en las dosis tradicionales de productos químicos y, durante por lo menos cuatro días, supervisar el funcionamiento de las diferentes unidades mediante la recolección y análisis de muestras.

Los principales parámetros de control de las dosis de coagulante y alcalinizante serán, sin duda, la turbiedad y el color del agua filtrada. En general, cuando la dosis de coagulante es inferior a un cierto valor crítico, la calidad del agua filtrada empeora. En caso de que el agua filtrada presente turbiedad y color bajos, con la reducción sugerida del 20%, se recomienda estudiar otras reducciones, de 30%, 40% y hasta un 50%, teniendo en cuenta que el principal parámetro de control es la turbiedad del agua filtrada. Esta información, conjuntamente con las medidas anteriormente citadas, permitirán verificar hasta qué punto es posible reducir la dosis de coagulante (y alcalinizante).

#### 4.2.3.3 Descripción de los resultados iniciales obtenidos en los ensayos realizados en la planta de tratamiento de São Carlos<sup>(21)</sup>.

#### 4.2.3.3.1 Ensayos con almidón de papa gelatinizado en caliente

La planta de tratamiento de São Carlos fue escogida con este fin, teniendo en cuenta su localización con relación al Laboratorio de Saneamiento de la Escuela de Ingeniería de São Carlos, y además, por contar con instalaciones apropiadas para la preparación de la suspensión, dosificación y aplicación de los polielectrolitos. En la época en la cual se realizaron los estudios el caudal medio de agua tratada era de 430 l/s.

La Figura No. 4.22 muestra esquemática las principales unidades que conformaban la instalación en referencia.

La solución de sulfato de aluminio era aplicada en el punto de mayor turbulencia de la canaleta Parshall y distribuida utilizando una canaleta perforada. Después de la canaleta Parshall existía una unidad mecánica de mezcla rápida con un volumen de 12.5 m<sup>3</sup>, con un tiempo de retención teórico de 29 segundos.

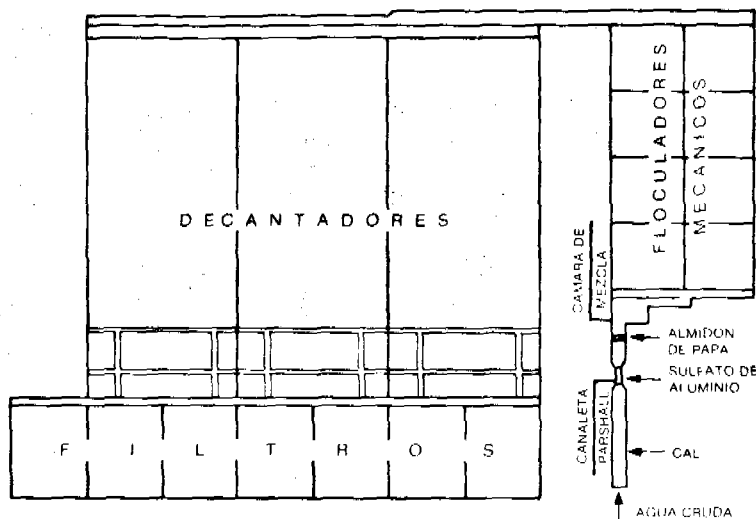


Fig. No. 4.22 - Esquema de la planta de tratamiento de de São Carlos, S.P. (23)

El proyecto original consideraba la aplicación de polielectrolito en un punto situado entre la canaleta Parshall y la unidad mecánica de mezcla rápida.

La floculación se realizaba en dos conjuntos de cuatro cámaras que funcionaban en paralelo. Cada una de las cámaras tenía un volumen útil de 144.0 m<sup>3</sup> (6.0 x 6.0 x 4.0 m<sup>3</sup>), a lo cual corresponde un tiempo de retención teórico, cuando ambos conjuntos están funcionando simultáneamente, de 44.7 minutos (volumen total = 1152.0 m<sup>3</sup>).

Durante los ensayos, dos de los conjuntos estaban fuera de operación, es decir, el tiempo de floculación teórico, en esta situación, resultó ser igual a 22.4 minutos. El gradiente de velocidad (G) en la primera cámara se estimó en 80 s<sup>-1</sup> y en la última cámara en 20 s<sup>-1</sup>.

La planta contaba con 3 (tres) decantadores iguales con una carga superficial estimada en 30.2 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> x día (área superficial de cada decantador = 32.0 x 12.8 = 409.6 m<sup>2</sup>) y una profundidad útil de las unidades de 4.0 m, a la cual corresponde un tiempo de retención teórico igual a 3.2 horas.

Después de su paso por los decantadores el agua era distribuida en 7 (siete) filtros rápidos de arena (área superficial de cada filtro 5.2 x 8.0 m<sup>2</sup> = 41.6 m<sup>2</sup>), lo cual representa una carga superficial media de 127.6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> día. Durante la realización de los ensayos, solamente estaban funcionando 6 (seis) filtros, lo cual indica que la carga superficial media se aumentaba a 148.0 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> día.

Antes de definir la técnica a utilizar en la preparación de la solución de almidón, se consideró conveniente evaluar las cantidades probables que serían consumidas diariamente, de acuerdo con las dosis ensayadas.

La Tabla 4.12 muestra el consumo diario de almidón para las dosis estudiadas.

Tabla No. 4.12 - Consumo diario de almidón de papa (caudal de agua tratada: 430 l/s)

DOSIS DE ALMIDON (mg/l)	CONSUMO (mg/s)	CONSUMO DIARIO (kg)
0.08	34.4	2.97
0.10	43.0	3.72
0.12	51.6	4.46
0.24	103.6	8.92

Se observa que las cantidades encontradas son extremadamente pequeñas, lo cual demuestra una gran facilidad para el almacenamiento, el manejo y la preparación de la solución, cuando el almidón es empleado como auxiliar de floculación.

Antes de iniciar el período de aplicación del almidón, se dedicaron algunos días al control y evaluación del funcionamiento de las principales unidades de la planta de tratamiento, utilizando únicamente cal y sulfato de aluminio.

En este período inicial (Etapa I) se controló la calidad del agua cruda, decantada y filtrada. Con el fin de obtener información complementaria, también se realizaron mediciones de la conductividad y del potencial zeta del agua coagulada y de los sólidos sedimentables del agua floculada.

Todas las actividades normales de la planta se desarrollaron en forma rutinaria, excepto que las dosis de cal y sulfato de aluminio pudieron ser mejor controladas a través del conocimiento del potencial zeta del agua coagulada. Esto permitió que las dosis utilizadas estuvieran más próximas a los valores ideales.

Durante los ensayos se estudiaron los siguientes parámetros:

*Agua Cruda:* Turbiedad, Color, pH, Alcalinidad, Conductividad, Potencial zeta, Temperatura.

*Agua Coagulada:* Conductividad, Potencial Zeta.

*Agua Decantada:* Turbiedad, Color, pH, Alcalinidad, Temperatura.

*Agua Filtrada:* Turbiedad, Color, pH, Alcalinidad, Temperatura.

Las muestras de agua cruda eran recolectadas en el canal de llegada, antes de la adición de la cal.

Las muestras de agua coagulada eran recolectadas en el vertedero de entrada de la primera cámara de floculación; mientras que las muestras de agua floculada se tomaron en el vertedero de salida de la última cámara de floculación.

Como esta planta de tratamiento contaba con tres decantadores en operación, se consideró conveniente tomar 1 (una) muestra a la salida de cada unidad. Los resultados considerados en el presente estudio corresponden, por lo tanto, a los valores medios obtenidos en los análisis y determinaciones de las tres muestras de los efluentes de los decantadores.

Las muestras de agua filtrada se tomaron en el canal que recibe el efluente de todos los filtros en operación. Los valores indicados en este estudio corresponden al promedio de los resultados obtenidos en dos muestras recolectadas en este canal.

El personal responsable de la planta de tratamiento de São Carlos, S.P., contaba con estudios anteriores que permitieron la construcción de tablas para calcular en forma preliminar las dosis de productos químicos necesarias, en función de las características del agua cruda. Las dosis aplicadas durante el período inicial de los ensayos (sin el empleo de almidón) fueron determinadas con la ayuda de estas tablas, previamente corregidas mediante las determinaciones del potencial zeta del agua coagulada. El potencial zeta del agua coagulada se determinaba inmediatamente después de la recolección de cada muestra, y, de acuerdo con el valor encontrado, se corregía(n) la(s) dosis de cal y/o sulfato de aluminio.

El día 07 de febrero de 1979, se iniciaron los ensayos con almidón de papa como auxiliar de floculación.

Para facilitar la presentación y análisis de los resultados, se consideró conveniente llamar etapas I, II, III, IV, V, VI y VII, a cada uno de los períodos en los cuales se ensayaron diferentes dosis de productos utilizados en la floculación. En las etapas I y VII no se adicionó almidón.

El seguimiento del funcionamiento de las unidades de la planta de tratamiento obedeció a los mismos criterios de la fase inicial, esto es, se conservaron los mismos puntos de muestreo y, para cada muestra, se realizaron los mismos análisis y determinaciones.

Se ensayaron dosis de almidón de 0.08; 0.10; 0.12 y 0.24 mg/l.

Las dosis de sulfato de aluminio y de cal, utilizadas conjuntamente con las dosis de almidón de 0.08; 0.12; y 0.24 mg/l (etapas IV, II y III, respectivamente) respetaron los valores de dosis óptimas utilizados normalmente por los operadores de la planta de tratamiento, con base en las tablas disponibles, correlacionando la calidad del agua cruda con las dosis recomendadas. Durante el desarrollo de las etapas V y VI, cuando la dosis de almidón era igual a 0.10 mg/l, las dosis de sulfato de aluminio y de cal fueron reducidas en aproximadamente un 80% (etapa V) y 65% (etapa VI), con relación a las dosis consideradas óptimas. Las etapas V y VI fueron incluidas en los ensayos con el objeto de verificar las posibles ventajas económicas, que se podrían tener con la reducción del consumo de cal y de sulfato de aluminio, como consecuencia de la utilización de almidón como auxiliar de floculación.

La turbiedad media en los efluentes de los decantadores, la cual era de 3.2 UJ (etapa I), llegó a ser igual a 1.7 UJ, cuando se aplicó una dosis de almidón de 0.12 mg/l (etapa II), resultando una reducción relativa de turbiedad del orden de 46.9%.

El mismo resultado favorable se obtuvo en la calidad de agua filtrada. En este caso se alcanzó una reducción máxima para la turbiedad de 62.5%, cuando se aplicó una dosis de almidón igual a 0.08 mg/l. La turbiedad media del agua filtrada, que era igual a 0.24 UJ, en la etapa I, se redujo a 0.09, en la etapa IV.

Es interesante observar que la dosis de almidón igual a 0.24 mg/l, que fue la mayor de las dosis utilizadas, no produjo la mejor calidad del agua decantada o de la filtrada.

Otro detalle muy importante para destacar entre las ventajas de utilizar polímeros, es la reducción del volumen de lodo sedimentado en los decantadores. Con el objeto de evaluar el volumen de lodo, se programó la determinación del volumen de sólidos sedimentables del agua floculada. El volumen de sólidos sedimentables, que era igual a 3.5 mg/l en la etapa I, se modificó a 1.9 mg/l en la etapa IV; lo cual demuestra que es posible obtener una reducción del orden del 45.7% en volumen de lodo retenido en los decantadores. Entre las ventajas de esta reducción, se tienen: mayor intervalo entre descargas (o limpiezas) de los decantadores y, consecuentemente una menor pérdida de agua, y además, menor volumen de lodo a ser evacuado o tratado.

Como se mencionó anteriormente, las etapas V y VI fueron previstas, principalmente, con el objetivo de verificar la posibilidad de obtener una reducción en el consumo de sulfato de aluminio y de cal, cuando se utiliza almidón como auxiliar de floculación. Los resultados obtenidos, en este caso, demuestran que es posible una reducción, de estos productos, hasta aproximadamente en un 65% de las dosis óptimas respectivas; y, así mismo, la turbiedad media del agua decantada y floculada presentó valores menores que los correspondientes verificados en la etapa I. El volumen de lodo, al igual que en las etapas II, III y IV, también se redujo en forma significativa.

Durante la etapa VII, se suspendió la aplicación de almidón y se conservaron las dosis de cal y de sulfato de aluminio, con valores aproximadamente iguales al 65% de los valores correspondientes a las dosis consideradas óptimas. Como era de esperarse este hecho produjo deterioro en la calidad del agua tratada; sin embargo, esta etapa se programó con el fin de comprobar los resultados obtenidos anteriormente con el empleo de almidón.

Con relación al color del agua decantada y del agua filtrada, también se puede afirmar que hubo una sensible mejoría, después del inicio de la utilización del almidón. El color medio del agua decantada y filtrada, durante la etapa I, fue de 10 un. de Pt-Co y 5 un. de Pt-Co, respectivamente; además, durante todo el periodo a través del cual se empleó el almidón, estos valores fueron reducidos a 5 un. de Pt-Co y aproximadamente cero, respectivamente.

En resumen, los ensayos demuestran que, para el agua estudiada, es posible obtener una mejor calidad de agua tratada empleando almidón de papa como ayudante de floculación, así mismo se reducen las dosis de cal y de sulfato de aluminio en aproximadamente un 65% de las dosis consideradas óptimas.

La calidad del agua cruda no ha sido considerada en la discusión de los resultados de los ensayos, sin embargo, en forma general, este hecho no afecta las conclusiones finales si se tiene en cuenta que no se presentaron variaciones sensibles en sus características durante el periodo en el cual se efectuaron los ensayos. La turbiedad media del agua cruda, durante este periodo fue aproximadamente igual a 30.0 UJ y la alcalinidad media, 9.5 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ .

Ahora, con base en estos resultados, se presentan algunas consideraciones sobre los costos estimados de productos químicos en cada una de las etapas de los ensayos.

El precio del Kg de sulfato de aluminio y de cal fue establecido de acuerdo con los valores pagados en la Planta de Tratamiento de São Carlos, en el mes de abril de 1980. Estos valores fueron: sulfato de aluminio: Cr \$ 5.30/kg; cal: Cr \$ 3.30/kg. El costo del almidón de papa utilizado fue Cr \$ 17.00/kg.

Los gastos parciales en almidón, son extremadamente pequeños en comparación con los gastos relativos a sulfato de aluminio y cal; para dosis de almidón de 0.08, 0.10, 0.12 y 0.24 mg/l, la cuantía consumida de este producto, por 1000 m<sup>3</sup> de agua tratada, corresponde a Cr \$ 1.40; Cr \$ 1.70; Cr \$ 2.00 y Cr \$ 4.00, respectivamente.

Es evidente que cuando no se hacen reducciones en las dosis de cal y de sulfato de aluminio se presenta un pequeño incremento en el costo del agua tratada, sin embargo cuando se realiza esta reducción, los resultados son realmente significativos.

Los valores presentados en la Tabla No. 4.13 corresponden a un estimativo de costos por concepto de los productos empleados en la floculación considerando 1 (un) mes de operación de la Planta de Tratamiento de São Carlos (Q = 430 l/s).

Comparando los valores encontrados en la etapa V (Cr \$ 121.487.00/mes) y en la etapa VI (Cr \$ 107.443.00/mes), con el valor determinado para la etapa I (Cr \$ 175.877.00/mes), es evidente la ventaja económica resultante de la aplicación de almidón como auxiliar de floculación.

Es natural que la aplicación en una planta de tratamiento, de sulfato de aluminio y de cal en dosis del orden del 65% de los valores óptimos, puede ocasionar problemas desagradables cuando ocurren cambios bruscos en la calidad del agua cruda.

Si se considera la hipótesis de que la planta de tratamiento estudiada fuera operada utilizando 0.10 mg/l de almidón y dosis de cal y de sulfato de aluminio igual al 80% de los valores correspondientes a las dosis óptimas, se tendría una reducción mensual de gastos del orden de Cr \$ 175.877.00 - Cr \$ 121.487.00 = Cr \$ 54.390.00. Lógicamente este valor fue determinado solamente con base en los datos encontrados en el periodo en estudio, sin embargo el conjunto en sí comprueba, de modo indiscutible la aplicabilidad del almidón de papa como auxiliar de floculación.

**Tabla No. 4.13 - Cuadro comparativo de los resultados obtenidos en las diferentes etapas de ensayos en la Planta de Tratamiento de São Carlos, S.P.<sup>(21)</sup>**

(1)	(2) DOSIFICACION PROMEDIA DE PRODUCTOS QUIMICOS EN EL PERIODO (mg/l)	TURBIEDAD MEDIA (UJ)			(6) VALORES PRO- MEDIOS DE SOLIDOS SEDI- MENTABLES EN EL AGUA FLOCULADA (ml/l)	(7) PRODUCTOS QUIMICOS. POR 1000 M <sup>3</sup> DE AGUA (Cr \$/1000 m <sup>3</sup> )		(8) EVALUACION DE LOS COSTOS MEN- SUALES PTA. SAO CARLOS Q - 430 l/s (Cr \$ / mes)
		(3) AGUA CRUDA	(4) AGUA DE- CAN- TADA	(5) AGUA FIL- TRA- DA		PARCIAL	TOTAL	
I	Sulf. de aluminio: 22.8 Cal: 11.2 Almidón: —	29.1	3.2	0.24	3.5	120.80 37.00 —	157.80	175.877.00
II	Sulf. de aluminio: 20.5 Cal: 10.0 Almidón: 0.12	24.7	1.7	0.11	2.3	108.70 33.00 2.00	143.70	160.162.00
III	Sulf. de aluminio: 20.9 Cal: 10.2 Almidón: 0.24	24.6	2.2	0.10	2.0	110.80 33.70 4.10	148.60	165.623.00
IV	Sulf. de aluminio: 20.9 Cal: 10.2 Almidón: 0.08	21.5	1.9	0.09	1.9	110.80 33.70 1.40	145.90	162.614.00
V	Sulf. de aluminio: 15.5 Cal: 7.6 Almidón: 0.10	35.5	2.0	0.10	1.8	82.20 25.10 1.70	109.00	121.487.00
VI	Sulf. de aluminio: 13.7 Cal: 6.7 Almidón: 0.10	37.8	2.3	0.15	1.9	72.60 22.10 1.70	96.40	107.443.00
VII	Sulf. de aluminio: 15.3 Cal: 7.5 Almidón: —	30.5	4.4	0.38	2.0	81.10 24.80 —	105.90	118.031.00

OBS.: Valor de la UPC = Cr\$ 546.64. Fecha: abril de 1980.

#### 4.2.3.3.2 Ensayos con almidón de araruta gelatinizado con soda cáustica<sup>(22)</sup>

Antes de iniciar los ensayos con almidón de araruta en la Planta de Tratamiento de São Carlos, se realizaron ensayos de floculación en el Laboratorio de Saneamiento de la EESC-USP, con el fin de verificar cual sería el almidón más apropiado para ser utilizado como auxiliar en el agua cruda afluente al sistema de tratamiento.

Después de la selección del almidón más adecuado, también se realizaron ensayos para estimar el orden de magnitud de la dosis que se adoptaría en los ensayos.

Las siguientes condiciones fueron observadas durante la realización de los ensayos:

- Volumen de cada reactor: 2000 ml
- Gradiente de velocidad durante la mezcla rápida:  $500 \text{ s}^{-1}$
- Tiempo de mezcla rápida 120 s
- Gradiente de velocidad durante la floculación:  $50 \text{ s}^{-1}$
- Tiempo de floculación: 1800 s
- Profundidad de recolección de las muestras en los reactores: 0.10 m

Para la selección del auxiliar de floculación más apropiado se utilizaron las muestras tomadas en la propia planta de tratamiento, en un punto situado inmediatamente después de la mezcla rápida.

En los ensayos de laboratorio se respetaron las condiciones básicas consideradas anteriormente y las muestras del sobrenadante (10.0 cm por debajo de la superficie), fueron tomadas después de 5.0; 15.0 y 30.0 minutos, del inicio de la sedimentación.

Se ensayaron 10 (diez) polímeros comerciales y almidones de araruta, papa, yuca, cará y maíz, como auxiliares de floculación.

Durante el periodo inicial de los estudios, el agua cruda presentó las siguientes características principales:

Turbiedad: entre 15.0 y 16.0 UT

Color: 25 un. de Pt-Co

pH: entre 5.7 y 6.1

Alcalinidad: entre 5.0 y 5.1 mg/l de CaCO<sub>3</sub>

Temperatura: entre 20.0 y 21.0 °C

Se realizaron decenas de ensayos de floculación, sin embargo sólo se presentarán los resultados correspondientes al polímero comercial para el cual se consiguieron los menores valores de turbiedad residual, así como los resultados correspondientes a los almidones de papa y de araruta, que fueron los polímeros naturales que mostraron una mayor eficiencia.

La Tabla No. 4.14 presenta en forma resumida, los resultados correspondientes a estos ensayos.

**Tabla No. 4.14 - Resultados de los ensayos que presentaron mayor eficiencia** <sup>(72)</sup>

ENSAYO	1	2	3	4	5	6	7
<b>Productos Aplicados</b>							
Sulf. de Aluminio (mg/l)	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
Cal (mg/l)	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6
Almidón de araruta (mg/l)	—	0.30	1.00	—	—	—	—
Almidón de papa (mg/l)	—	—	—	0.30	1.00	—	—
Drewfloc 307 (mg/l)	—	—	—	—	—	0.12	0.25
<b>Características del sobrenadante</b>							
Turbiedad después de 5.0 min de sedimentación (UT)	5.1	4.6	4.1	2.3	1.8	1.4	0.80
Turbiedad después de 15.0 min de sedimentación (UT)	1.8	1.7	1.4	1.4	1.6	0.94	0.75
Turbiedad después de 30.0 min de sedimentación (UT)	1.8	1.0	0.90	1.1	1.6	0.73	0.64
pH final	6.88	6.76	6.78	6.76	6.78	6.75	6.75
Color final (mg/l de Pt-Co)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

La columna 1 (uno) presenta los resultados correspondientes a la aplicación de las dosis óptimas de sulfato de aluminio y de cal.

El polímero comercial ensayado, (ver columna 7 de la Tabla No. 4.14), presenta resultados más atractivos que los encontrados con la utilización de almidón, sin embargo esta situación no se presenta para la mayoría de los productos comerciales estudiados dentro del rango de las dosis aplicadas.

Los resultados relacionados con la remoción de turbiedad, en función del tiempo (5.0, 15.0 y 30.0 min) presentados en las columnas 2, 3, 4 y 5, muestran que, para el agua estudiada, el almidón de papa forma flóculos que sedimentan con mayor velocidad que los correspondientes al caso en el cual se aplicó almidón de araruta, pero el almidón de araruta, tiene capacidad de dejar menor concentración de material en suspensión, cuando el tiempo de sedimentación es incrementado (ver datos relativos a 30 minutos de sedimentación).

Para este trabajo fue escogido el almidón de araruta considerando su menor costo y su mayor facilidad de adquisición en el comercio del Estado de São Paulo.

Antes de iniciar los ensayos propiamente dichos, se realizaron nuevamente varias series de ensayos de laboratorio, con el fin de confirmar los resultados verificados en los ensayos anteriores.

Estos ensayos de floculación, realizados en el periodo en el cual se iniciaron las pruebas de campo, demostraron que una dosis de 0.10 mg/l de almidón de araruta ya provocaba pequeñas alteraciones en la calidad del agua sobrenadante, sin embargo, aparentemente, los resultados mejoraban a medida que la dosis de almidón se incrementaba. A partir de 1.0 mg/l, el aumento de la eficiencia no se justificaba por el incremento en los costos resultante del aumento en la dosis.

Con base en esta información se establecieron tres dosis de almidón para ser ensayadas en la planta de tratamiento: 0.10 mg/l, 0.50 mg/l y 1.0 mg/l.

La suspensión de almidón se preparaba en los tanques mostrados en la Figura No. 4.6; el volumen útil de cada tanque de preparación es de aproximadamente 1300 litros.

En general, para la aplicación de polielectrolitos comerciales, la concentración de la solución raramente sobrepasa el 0.5%, sin embargo para la preparación de la suspensión de almidón en esta investigación, se utilizó una concentración del 1.5% en masa.

La preparación de la suspensión siguió el criterio presentado anteriormente.

Los ensayos iniciales efectuados con una dosis de 0.10 mg/l, mostraron muy poca mejoría en la calidad del agua, de forma tal que en las primeras horas de aplicación, la dosis fue incrementada a 1.00 mg/l.

Con esta nueva condición, la mejoría en el proceso de floculación resultó sorprendente, lo cual permitió que la mitad de las cámaras de floculación fueran retiradas de operación, lo que redujo el tiempo de floculación de 44.7 min en condiciones de funcionamiento normal, a 22.4 minutos.

Después de un período de aplicación de la dosis de 1.0 mg/l de almidón de araruta, se realizaron ensayos empleando dosis iguales a 0.50 mg/l.

Durante el período de aplicación de la dosis de 0.50 mg/l, además de mantener el tiempo de floculación en 22.4 min., las dosis de sulfato de aluminio y de cal se redujeron al 80% con respecto a los valores generalmente utilizados en esta planta de tratamiento.

Para este estudio, el control de la Planta de Tratamiento de São Carlos fue realizado antes y durante la aplicación del almidón de araruta.

El agua cruda era tomada a la entrada de la planta, antes de la aplicación de la cal y del sulfato de aluminio.

El agua floculada era recolectada al inicio del canal efluente, después de la última cámara de floculación.

Se tomaron muestras a la salida de cada uno de los tres decantadores. Los resultados presentados corresponden al promedio de los tres valores obtenidos.

Las muestras de agua filtrada se tomaron en dos puntos del canal de salida de los filtros, antes de la aplicación del cloro. Los valores presentados corresponden al promedio de los resultados encontrados en estos dos puntos.

La Tabla No. 4.15 presenta los resultados correspondientes al período anterior a la realización de los ensayos con almidón, cuando la planta de tratamiento estaba siendo operada de acuerdo con los criterios tradicionales.

La Tabla No. 4.16 muestra los resultados correspondientes al período en el cual se aplicó una dosis de almidón igual a 1.00 mg/l, con un tiempo de floculación reducido a 22.4 min.

La Tabla No. 4.17 presenta los resultados encontrados en el período para el cual se utilizó una dosis de almidón de 0.50 mg/l y un tiempo de floculación de 22.4 min. Las dosis de cal y de sulfato de aluminio fueron reducidas en un 20% con respecto a las dosis generalmente utilizadas en esta planta de tratamiento, cuando el agua cruda presentaba las características encontradas en esta ocasión. A este criterio se asocia una economía del 20% en los costos de coagulantes primarios.



**Tabla No. 4.15 - Control de la planta de tratamiento, período anterior a los ensayos con almidón<sup>(22)</sup>**  
**(Tiempo de Floculación: 44.7 minutos)**

FECHA	HORA	AGUA CRUDA					AGUA FLOCULADA	AGUA DECANTADA					AGUA FILTRADA				
		pH	ALCALINIDAD (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	TURBIEDAD (UT)	COLOR (mg/l de Pt-Co)	TEMPERATURA (°C)	SOLIDOS SEDI-MENTABLES (ml/l)	pH	ALCALINIDAD (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	TURBIEDAD (UT)	COLOR (mg/l de Pt-Co)	TEMPERATURA (°C)	pH	ALCALINIDAD (en mg/l CaCO <sub>3</sub> )	TURBIEDAD (UT)	COLOR (mg/l Pt-Co)	TEMPERATURA (°C)
26.01	9:00	6.05	9.57	39.0	110	24.0	2.5	6.90	11.73	4.9	10	24.0	6.60	10.95	0.60	5.0	24.0
26.01	15:00	6.00	8.25	29.0	110	24.5	2.0	6.50	10.12	4.5	10	24.5	6.50	9.92	1.50	7.5	24.5
27.01	8:30	6.00	8.99	22.0	110	23.0	2.0	6.30	10.15	3.9	7.5	23.0	6.40	10.22	0.55	5.0	23.0
27.01	15:00	6.00	7.93	20.0	100	23.5	0.6	6.80	12.50	4.6	10	23.5	6.40	10.81	0.75	5.0	23.5
28.01	9:00	6.01	8.23	24.0	100	22.5	0.5	6.70	11.21	4.8	10	22.5	6.50	11.21	1.10	7.5	22.5
28.01	16:00	5.80	8.08	26.0	100	22.5	1.0	6.90	10.31	4.2	10	22.5	6.35	12.20	0.55	5.0	22.5
29.01	9:00	6.00	7.78	22.0	100	24.0	1.2	6.45	12.10	4.1	12.5	24.0	6.60	11.35	0.60	5.0	24.0
29.01	15:00	6.20	9.05	22.0	100	23.0	1.0	6.50	11.13	4.5	10	23.0	6.40	10.98	0.58	5.0	23.0
PROMEDIO		6.01	8.49	25.5	104	23.4	1.4	6.63	11.16	4.4	10	23.4	6.47	10.90	0.78	5.6	22.9

Tabla No. 4.16 Control de la planta de tratamiento, utilizando 1.0 mg/l de almidón<sup>(22)</sup>  
(Tiempo de Floculación: 22.4 minutos)

FECHA	HORA	DOSIS (mg/l)			AGUA CRUDA					AGUA FLOCULADA	AGUA DECANTADA					AGUA FILTRADA				
		SULFATO	CAL	ALMIDON	pH	ALCALINIDAD (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	TURBIEDAD (UT)	COLOR (mg/l de Pt-Co)	TEMPERATURA (°C)	SOLIDOS SEDIMENTABLES (ml/l)	pH	ALCALINIDAD (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	TURBIEDAD (UT)	COLOR (mg/l de Pt-Co)	TEMPERATURA (°C)	pH	ALCALINIDAD (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	TURBIEDAD (UT)	COLOR (mg/l de Pt-Co)	TEMPERATURA (°C)
03.02	17:00	29.17	20.4	1.0	5.50	5.03	36.0	150	21.0	2.5	6.16	7.02	2.9	7.5	21.0	5.99	7.63	0.23	< 5	21.0
03.02	20:00	21.74	15.22	1.0	5.69	5.11	37.0	90	21.5	3.5	6.20	7.62	3.4	7.5	21.5	5.99	7.93	0.55	< 5	21.5
03.02	23:00	21.74	15.22	1.0	5.70	5.64	33.0	110	22.0	4.0	6.04	7.32	2.1	5.0	22.0	6.04	7.32	0.33	< 5	22.0
04.02	8:00	17.39	12.17	1.0	5.65	5.80	28.0	90	22.0	3.5	6.20	9.76	3.4	7.5	22.0	6.08	8.84	0.33	< 5	22.0
04.02	11:00	14.13	9.89	1.0	5.90	5.74	31.0	100	24.0	1.8	6.15	8.26	4.5	10.0	24.0	6.10	8.20	0.90	7.5	24.0
PROMEDIO		20.83	14.58	1.0	5.69	5.46	33.0	108	22.1	3.1	6.15	8.00	3.3	7.5	22.1	6.04	7.98	0.47	< 5	22.1

**Tabla No. 4.17 Control de la planta de tratamiento, empleando 0.5 mg/l de almidón (Tiempo de floculación: 22.4 minutos), y 80% de la dosis de sulfato de aluminio y cal utilizadas normalmente para las condiciones de turbiedad y color del agua cruda<sup>(22)</sup>**

		DOSIS (mg/l)			AGUA CRUDA					AGUA FLOCULADA	AGUA DECANTADA					AGUA FILTRADA				
FECHA	HORA	SULFATO	CAL	ALMIDON	pH	ALCALINIDAD (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	TURBIEDAD (UT)	COLOR (mg/l de Pt-Co)	TEMPERATURA (°C)	SOLIDOS SEDIMENTABLES (ml/l)	pH	ALCALINIDAD (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	TURBIEDAD (UT)	COLOR (mg/l de Pt-Co)	TEMPERATURA (°C)	pH	ALCALINIDAD (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	TURBIEDAD (UT)	COLOR (mg/l de Pt-Co)	TEMPERATURA (°C)
04.02	17:00	13.04	9.13	0.5	5.91	5.68	27.0	90	23.0	2.0	6.02	7.84	3.3	7.5	23.0	6.05	7.62	0.42	< 5	23.0
04.02	20:00	13.04	9.13	0.5	5.96	5.91	26.0	90	23.0	1.0	6.05	7.21	3.6	7.5	23.0	6.14	7.20	0.38	< 5	23.0
04.02	23:00	13.04	9.13	0.5	5.83	6.10	26.0	90	23.5	0.7	5.61	5.96	3.0	7.5	23.5	5.73	6.53	0.40	< 5	23.5
05.02	8:00	8.69	6.08	0.5	5.95	8.69	22.0	90	23.5	0.8	5.90	7.32	2.3	5.0	23.5	5.83	6.86	0.35	< 5	23.5
05.02	11:00	15.22	10.65	0.5	5.93	7.54	21.0	100	24.0	1.8	6.04	7.61	2.6	7.5	24.0	6.00	7.43	0.31	< 5	24.0
05.02	14:00	13.04	9.13	0.5	5.71	7.31	21.0	110	24.0	1.2	5.99	7.39	2.3	7.5	24.0	5.96	7.20	0.36	< 5	24.0
05.02	17:00	13.04	9.13	0.5	5.82	8.14	22.0	110	24.0	1.0	6.01	8.20	2.6	7.5	24.0	5.95	8.12	0.32	< 5	24.0
05.02	20:00	12.32	8.62	0.5	5.75	7.91	18.0	100	24.0	1.4	5.90	7.99	2.1	5.0	24.0	5.83	7.82	0.15	< 5	24.0
05.02	23:00	12.32	8.62	0.5	5.93	8.06	18.0	100	24.5	1.3	6.00	8.15	2.3	5.0	24.5	5.91	8.13	0.30	< 5	24.5
06.02	7:00	11.23	8.62	0.5	5.91	8.41	19.0	100	24.5	1.0	6.10	8.26	2.2	5.0	24.5	5.96	8.10	0.25	< 5	24.5
PROMEDIO		12.50	8.82	0.5	5.87	7.38	21.9	98	23.8	1.2	5.96	7.59	2.6	6.5	23.8	5.94	7.50	0.32	< 5	23.5

La Tabla No. 4.18 presenta un resumen de las condiciones medias obtenidas en cada período de ensayo, permitiendo una idea objetiva de los resultados obtenidos.

**Tabla No. 4.18 - Características promedio (color, turbiedad y sólidos sedimentables) observadas durante el período de control de la Planta de Tratamiento de São Carlos.**

PERIODO DEL ENSAYO PARAMETRO	OPERACION NORMAL (Tiempo de floc. 44.7 min.)	DOSIS DE ALMIDON 1.0 mg/l (tiempo de floc. 22.4 min)	DOSIS DE ALMIDON 0.5 mg/l, DOSIS DE COAGULANTE 80% (tiempo de floc. 22.4 min)
TURBIEDAD (UT)			
agua cruda	25.5	33.0	21.9
agua decantada	4.4	3.3	2.6
agua filtrada	0.78	0.47	0.32
COLOR (un. de Pt-Co)			
agua cruda	104	108	98
agua decantada	10	7.5	6.5
agua filtrada	5.6	< 5	< 5
SOLIDOS SEDIMENTABLES (mg/l)			
agua floculada	1.4	3.1	1.2

La Tabla No. 4.18 muestra como, a pesar de la reducción del tiempo de floculación a la mitad del tiempo utilizado en la planta, la calidad del agua decantada y filtrada mejoró sensiblemente, cuando se utilizó el almidón de araruta como auxiliar de floculación, en lo relacionado con la remoción de turbiedad y color.

La dosis de 0.50 mg/l resultó más apropiada que la de 1.00 mg/l, en forma contraria a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio.

Se observa que los consumos promedio de sulfato de aluminio y cal, iguales a 20.83 y 14.58 mg/l (Tabla No. 4.14) en los días anteriores a los ensayos con dosis de almidón de 0.50 mg/l, se redujeron a 12.50 y 8.82 mg/l respectivamente (Tabla No. 4.15).

Evidentemente, que parte de esta reducción se debe a las variaciones en los valores de la turbiedad y del color del agua cruda, sin embargo, es conveniente recordar que, durante todo el período correspondiente a los ensayos presentados en la Tabla No. 4.15 se utilizaron dosis iguales al 80% de los valores empleados por los operadores en condiciones similares de turbiedad y color.

A continuación se presenta un resumen de las conclusiones de esta investigación:

- El almidón de araruta gelatinizado con hidróxido de sodio, presenta buenas características como auxiliar de floculación.
- El aumento de la dosis de almidón de araruta no implica necesariamente mejoría en la calidad del agua tratada.
- La técnica de gelatinización con soda cáustica (hidróxido de sodio) puede ser utilizada fácilmente por los operadores típicos de plantas de tratamiento de tamaño mediano, en el Brasil.
- El equipo (tanques, canaletas y bombas dosificadoras) normalmente utilizado en la aplicación de polímeros comerciales puede ser usado, con algunas modificaciones, para la aplicación de almidón gelatinizado con soda cáustica.
- El almidón de papa gelatinizado en caliente <sup>(10)</sup> presenta resultados ligeramente mejores (para el agua estudiada), que el almidón de araruta gelatinizado en frío.

- Para el agua estudiada, con la aplicación del almidón de araruta como auxiliar de floculación, fue posible reducir el tiempo de coagulación a la mitad del tiempo empleado normalmente, cuando solamente se aplica sulfato de aluminio y cal.
- Fue posible reducir en 20% las dosis óptimas de sulfato de aluminio y de cal, cuando se aplicó almidón de araruta con dosis de 0.50 mg/l y, se observó además una mejoría en la calidad del agua tratada.
- La calidad del agua tratada mejoró sensiblemente cuando se aplicó almidón de araruta como auxiliar de floculación

### 4.3 El almidón como auxiliar de filtración

#### 4.3.1 Consideraciones preliminares

El uso de los polímeros como auxiliares en filtración directa ha sido muy recomendado con el fin de evitar la saturación y ruptura del medio. Esta idea ha posibilitado el estudio de lechos filtrantes con espesor y granulometría mayores, trayendo consigo la aplicación de tasas de filtración más elevadas. Adicionalmente, el uso de polímeros como auxiliares en la filtración directa ha permitido la producción de agua de calidad satisfactoria aunque se presenten cambios bruscos en la calidad del agua cruda.

A continuación, se muestran los resultados de las investigaciones realizadas con el uso de almidón de papa, como auxiliar, en la filtración directa ascendente y descendente.

#### 4.3.2 Resultado del uso del almidón en filtración directa

La Tabla No. 4.19 presenta un resumen de los resultados obtenidos en las investigaciones realizadas con almidón de papa utilizado como ayudante en filtración directa descendente. El medio filtrante estaba formado por arena (25 cm de espesor y tamaño efectivo de 0.5 mm) y antracita (45 cm. de espesor y tamaño efectivo de 0.9 mm).

Tabla No. 4.19 - Resultados del uso de almidón de papa como ayudante en filtración directa descendente

TASA DE FILTRACION (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> . día)	TURBIEDAD DEL AFLUENTE (UT)			TURBIEDAD DEL EFLUENTE (UT)			COLOR MAXIMO (Un Pt-Co)		DOSIS DE ALMIDON DE PAPA (mg/l)	TIEMPO MEDIO DE OPERACION (HORAS)
	MAX	MIN	MED	MAX	MIN	MED	AFLUENTE	EFLUENTE		
120	110	35	62.6	3.0	0.10	1.16	300	0	—	15.75
150	200	35	99.8	5.0	0.50	1.33	500	25	—	18.87
180	140	20	39.9	5.0	0.55	0.87	450	10	—	17.75
	40	25	32.0	1.0	0.45	0.75	150	0	0.05	17.00
	40	30	35.0	1.0	0.50	0.65	140	0	0.10	15.00
	35	25	30.0	1.0	0.50	0.70	170	0	0.20	14.00
	35	30	31.4	1.0	0.50	0.75	140	0	0.40	14.50
210	90	35	47.8	3.0	0.35	1.04	265	0	—	14.45
240	120	50	84.0	1.5	0.50	0.92	350	0	—	13.50
270	110	40	69.9	1.0	0.40	0.91	350	0	—	13.25
300	80	35	60.7	2.0	0.50	0.94	280	0	—	11.05
	75	30	37.5	1.0	0.50	0.82	160	0	0.05	12.75
	40	30	37.0	1.0	0.50	0.76	160	0	0.10	11.75
	45	30	36.0	1.2	1.00	1.05	150	0	0.20	12.75
	45	30	38.6	1.5	1.00	1.09	150	0	0.40	11.75

Las Figuras Nos. 4.23 y 4.24 muestran el comportamiento del filtro funcionando con y sin el uso de almidón de papa como auxiliar de filtración.

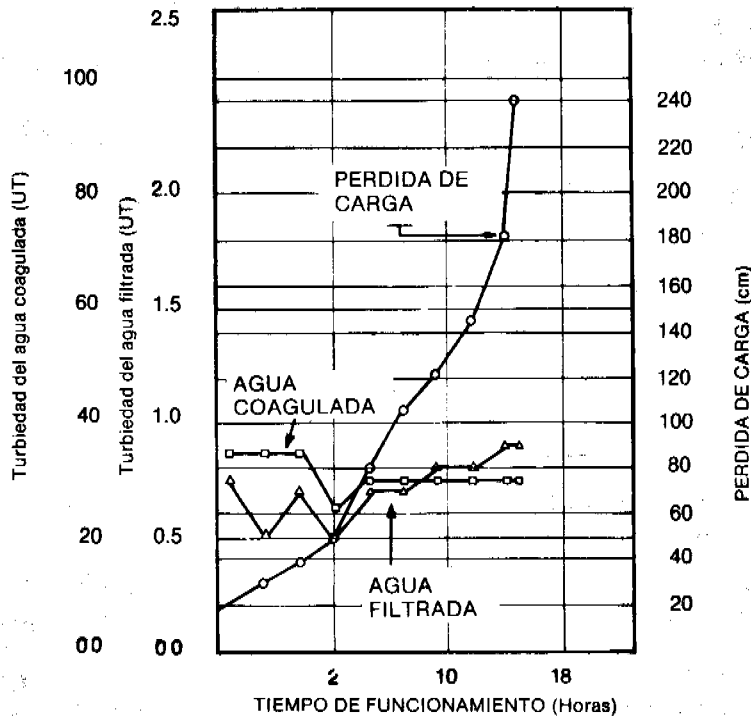


Fig. No. 4.23 - Turbiedad del agua cruda y filtrada, y pérdida de carga en el medio filtrante en función del tiempo de operación.

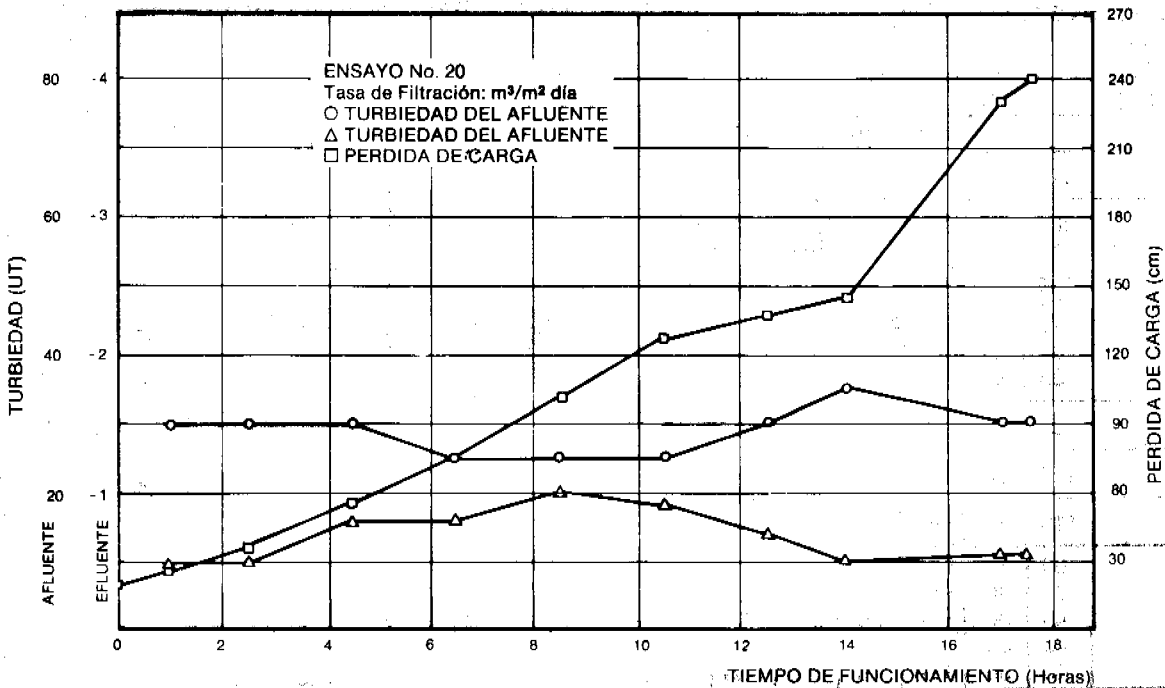


Fig. No. 4.24 - Turbiedad del agua cruda y filtrada, y pérdida de carga en el medio filtrante en función del tiempo de operación (sin la utilización de auxiliares de filtración).

En general, para las tasas de filtración comprendidas entre 120 y 300 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. día, la turbiedad del efluente del filtro no sufrió variaciones significativas cuando se utilizó almidón de papa como auxiliar de filtración, aunque la calidad del afluente cambiara considerablemente. Se observó también, que la calidad del agua filtrada no estaba tan influenciada por las imprecisiones en la dosificación del coagulante (sulfato de aluminio), cuando se utilizó el almidón.

Entre tanto, la tasa de crecimiento de la pérdida de carga resultó mucho más acentuada en el caso de los ensayos para los cuales se utilizó almidón, lo cual puede ser observado en la Figura No. 4.23.

En la filtración directa ascendente el uso del almidón como auxiliar de filtración fue ensayado para verificar, principalmente, si los valores máximos de turbiedad (y microorganismos) se reducirían al realizar descargas de fondo periódicas durante la carrera de filtración. A pesar de que con esta forma de operación se pueden obtener carreras de filtración con duraciones entre 2 y 5 veces más largas en comparación con las obtenidas en filtros que no utilizan este método, se observa que ocurren valores máximos de turbiedad (y microorganismos) después de finalizar la descarga y reiniciar la filtración<sup>(33)</sup>.

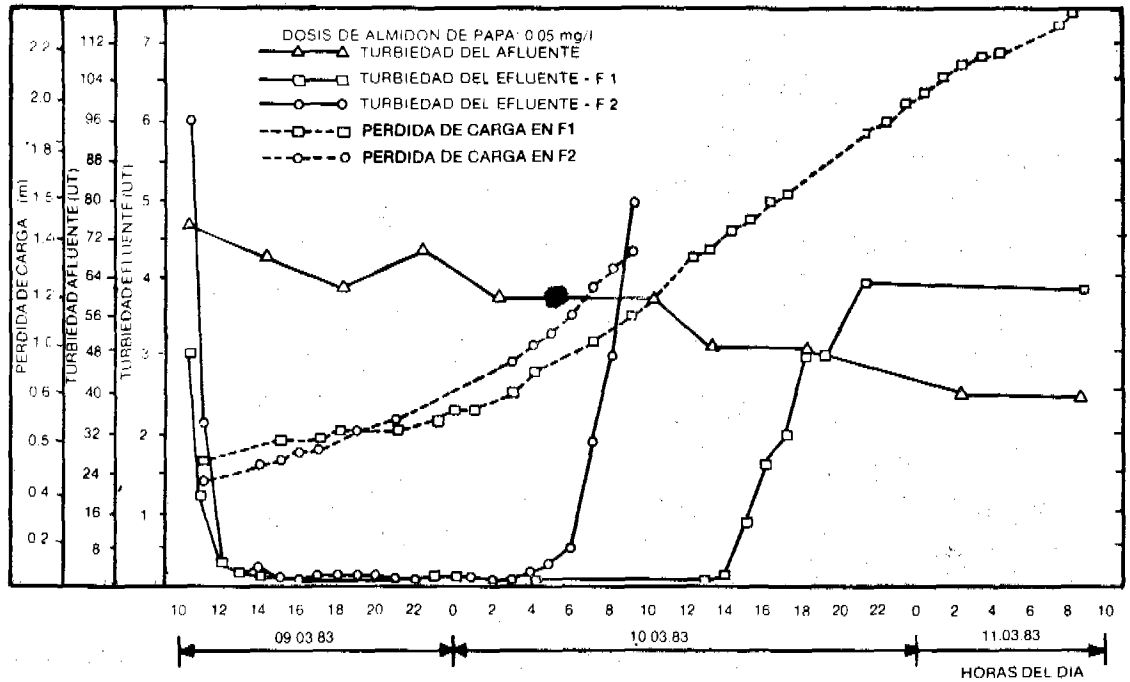


Fig. No. 4.25 - Método de operación: sin descargas periódicas. Tasa de filtración: 120 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> día<sup>(33)</sup>

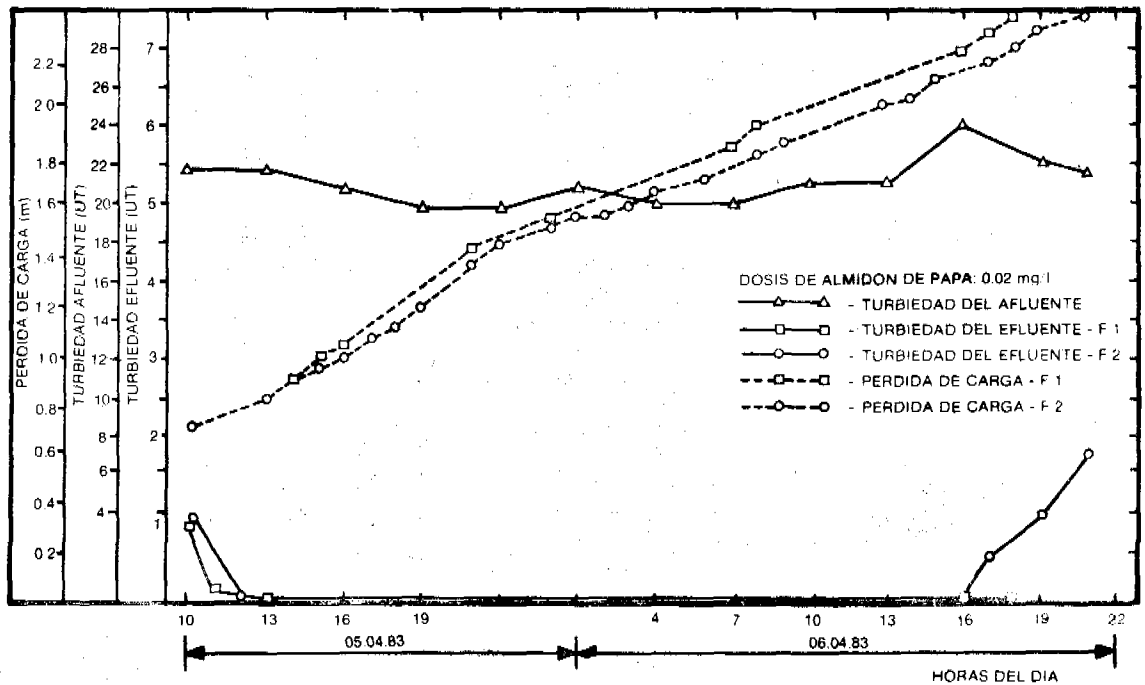


Fig. No. 4.26 - Método de operación: sin descargas periódicas. Tasa de filtración: 180 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> día<sup>(33)</sup>





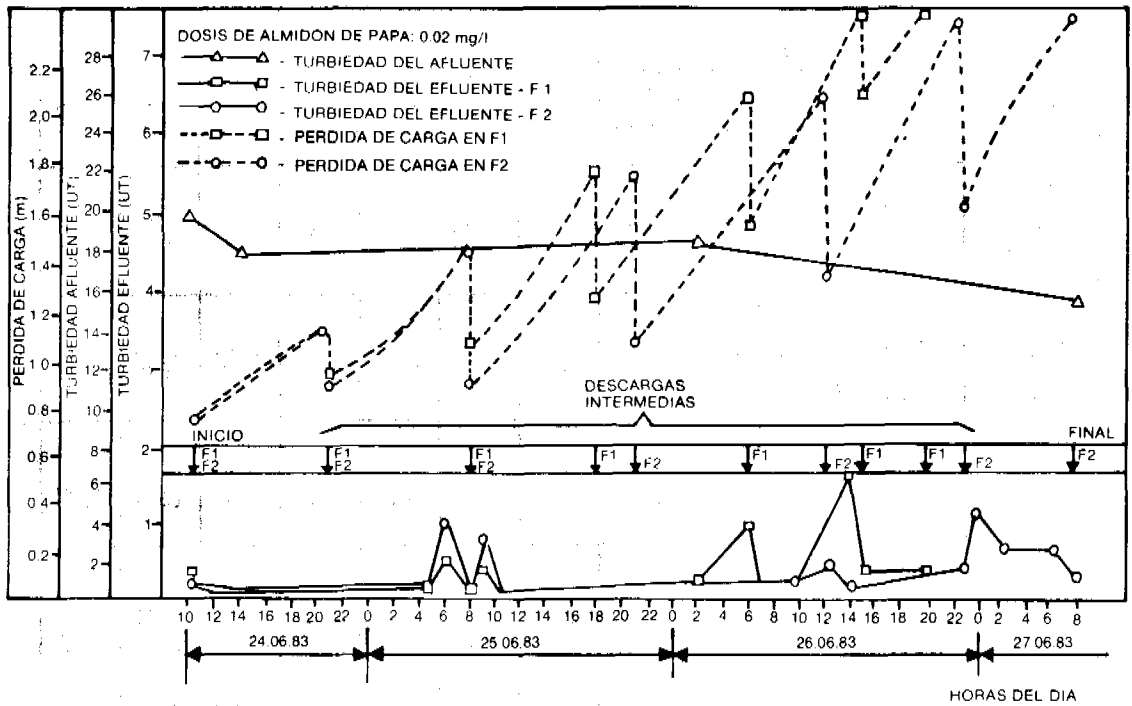


Fig. No. 4.29 - Método de operación: con descargas periódicas. Tasa de filtración:  $180 \text{ m}^3/\text{m}^2, \text{ día}$  <sup>(33)</sup>.

Las Figuras Nos. 4.25, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29 y 4.30 presentan los resultados del funcionamiento de los filtros con y sin descargas de fondo periódicas. Se observa que con el uso del almidón de papa como auxiliar de filtración, mejora la calidad del agua filtrada y los valores máximos de turbiedad son atenuados, sin embargo, la tasa de crecimiento de la pérdida de carga es mayor <sup>(33)</sup>.

La Tabla No. 4.17 muestra los resultados de investigaciones recientes donde se comparó el funcionamiento de dos filtros, uno de ellos (F1), recibía agua coagulada en la Planta de Tratamiento de São Carlos (coagulación por barrido) y el otro (F2), recibía agua coagulada de la instalación en estudio, con dosis de sulfato de aluminio entre 25% y el 75% del valor usado en la Planta de Tratamiento de São Carlos.

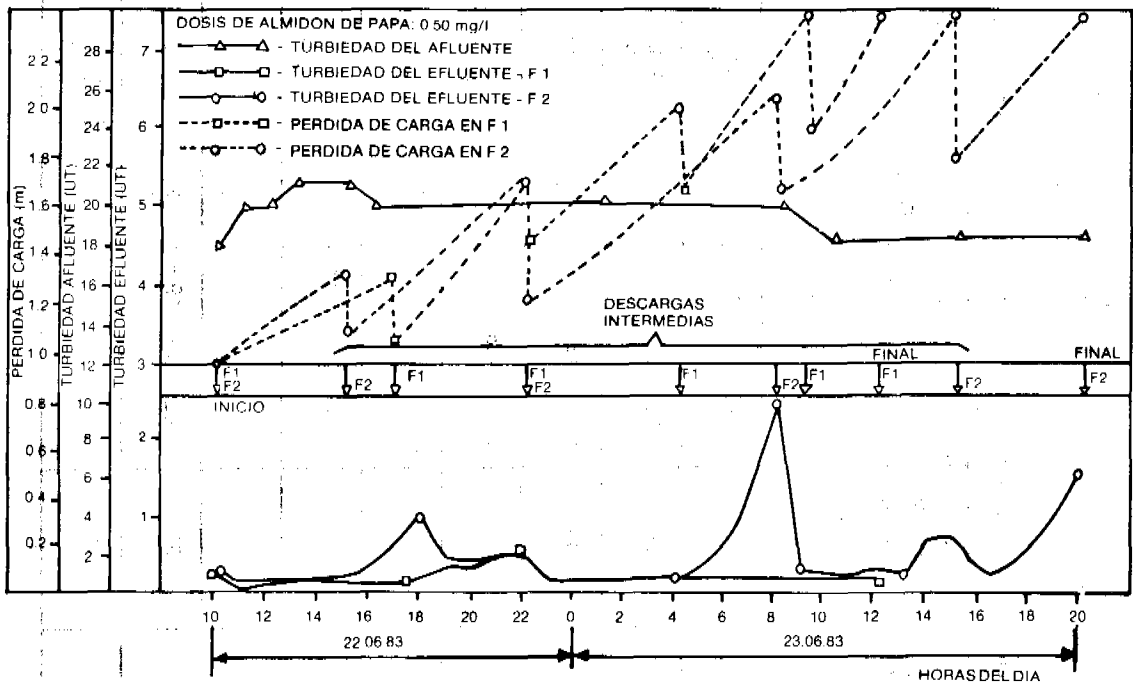


Fig. No. 4.30 - Método de operación: con descargas periódicas. Tasa de filtración:  $240 \text{ m}^3/\text{m}^2, \text{ día}$  <sup>(33)</sup>.

Tabla No. 4.20 Uso del almidón como ayudante de filtración

Nº DE ENSAYO	TASA DE FILTRACION (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> día)	TURBIEDAD DEL AGUA COAGULADA (UT)			FILTRO	TURBIEDAD DEL EFLUENTE (UT)			PERDIDA DE CARGA TOTAL (m)	DURACION DE LA CARRERA DE FILTRACION (Horas)	DOSIS (mg/l)			pH DE COAGULACION
		MAX	MIN	MED		MAX	MIN	MED			SULFATO	CAL		
1	180	30.0	19.5	22.7	F <sub>1</sub>	3.00	0.07	0.20	2.40	19:20	14.2	—	—	5.7 - 6.0
					F <sub>2</sub>	1.34	0.09	0.17	2.40	21:00	14.2	—	—	5.7 - 6.0
2	180	20.0	13.4	15.4	F <sub>1</sub>	3.00	0.06	0.18	1.32	14:50	16.7	3.5	—	6.3 - 6.5
					F <sub>2</sub>	2.50	1.68	1.98	2.40	30:40	4.3	—	0.23	5.9 - 6.2
3	180	24.8	14.2	16.4	F <sub>1</sub>	3.00	0.08	0.18	1.18	10:15	20.8	3.9	—	6.3 - 6.5
					F <sub>2</sub>	1.86	0.17	0.48	2.04	24:00	6.8	—	0.92	5.9 - 6.2
4	240	160	42	99	F <sub>1</sub>	3.00	1.70	—	0.87	1:00	46.6	8.6	—	6.3 - 6.6
					F <sub>2</sub>	3.00	0.65	1.50	2.20	11:00	11.5	—	—	5.9 - 6.1
5	180	25.0	13.8	19.4	F <sub>1</sub>	3.00	0.07	0.19	1.12	8:30	23.6	4.9	—	6.3 - 6.4
					F <sub>2</sub>	0.80	0.04	0.08	2.40	26:30	11.5	2.3	1.04	5.9 - 6.3
6	240	130	34	63	F <sub>1</sub>	3.00	0.15	—	1.12	2:30	47.6	8.9	—	6.1 - 6.2
					F <sub>2</sub>	2.30	0.06	0.90	2.40	11:45	24.0	—	—	5.8 - 6.0
7	240	25.8	16.0	19.6	F <sub>1</sub>	3.00	0.20	0.32	1.32	4:05	22.2	4.5	—	6.2 - 6.4
					F <sub>2</sub>	0.23	0.03	0.06	2.40	11:50	11.1	—	1.00	5.8 - 6.0
8	180	18.2	11.6	13.4	F <sub>1</sub>	3.00	0.08	0.14	1.33	13:40	15.9	4.2	—	6.3 - 6.4
					F <sub>2</sub>	0.54	0.04	0.08	2.32	27:30	11.6	2.9	0.09	6.0 - 6.1
9	120	30.0	15.7	19.8	F <sub>1</sub>	3.00	0.06	0.15	1.28	24:10	20.0	4.1	—	6.3 - 6.4
					F <sub>2</sub>	0.24	0.10	0.14	2.40	43:20	14.6	3.5	0.48	5.9 - 6.1
10	240	30.0	15.8	20.2	F <sub>1</sub>	3.00	0.08	0.28	1.20	3:45	21.1	4.3	—	6.3 - 6.4
					F <sub>2</sub>	0.28	0.09	0.13	2.40	16:15	15.5	3.5	0.53	5.9 - 6.2

Las Figuras Nos. 4.31 a 4.41 muestran los resultados correspondientes a los ensayos presentados en la Tabla No. 4.17 <sup>(34)</sup>.

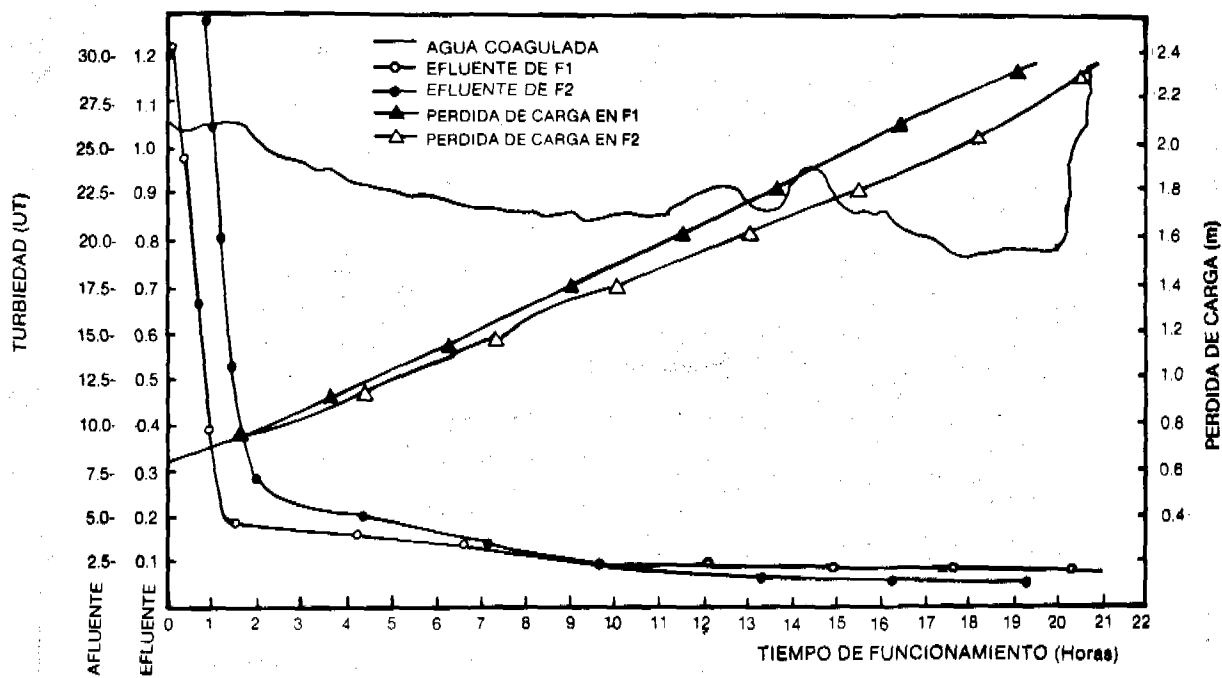


Fig. No. 4.31 - Resultados de operación. Ensayo No. 01 <sup>(34)</sup>.

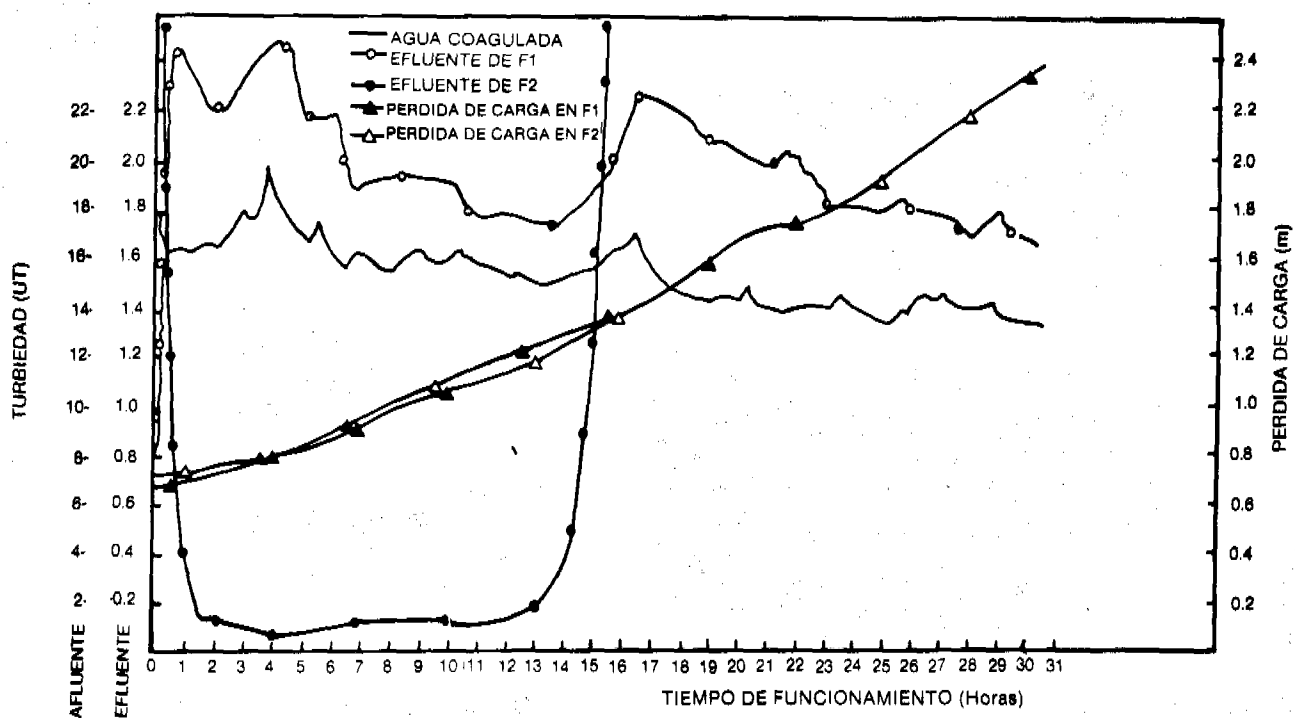


Fig. No. 4.32 - Resultados de operación. Ensayo No. 02 <sup>(34)</sup>.

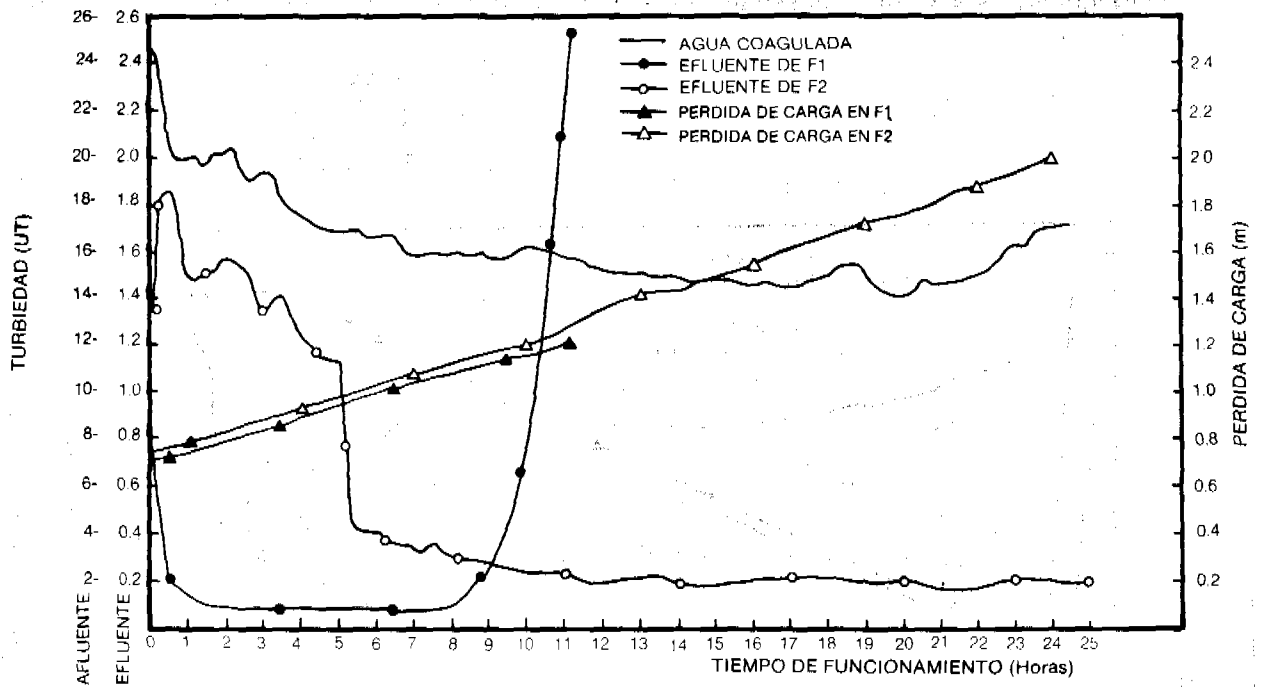


Fig. No. 4.33 - Resultados de operación. Ensayo No. 03<sup>(34)</sup>

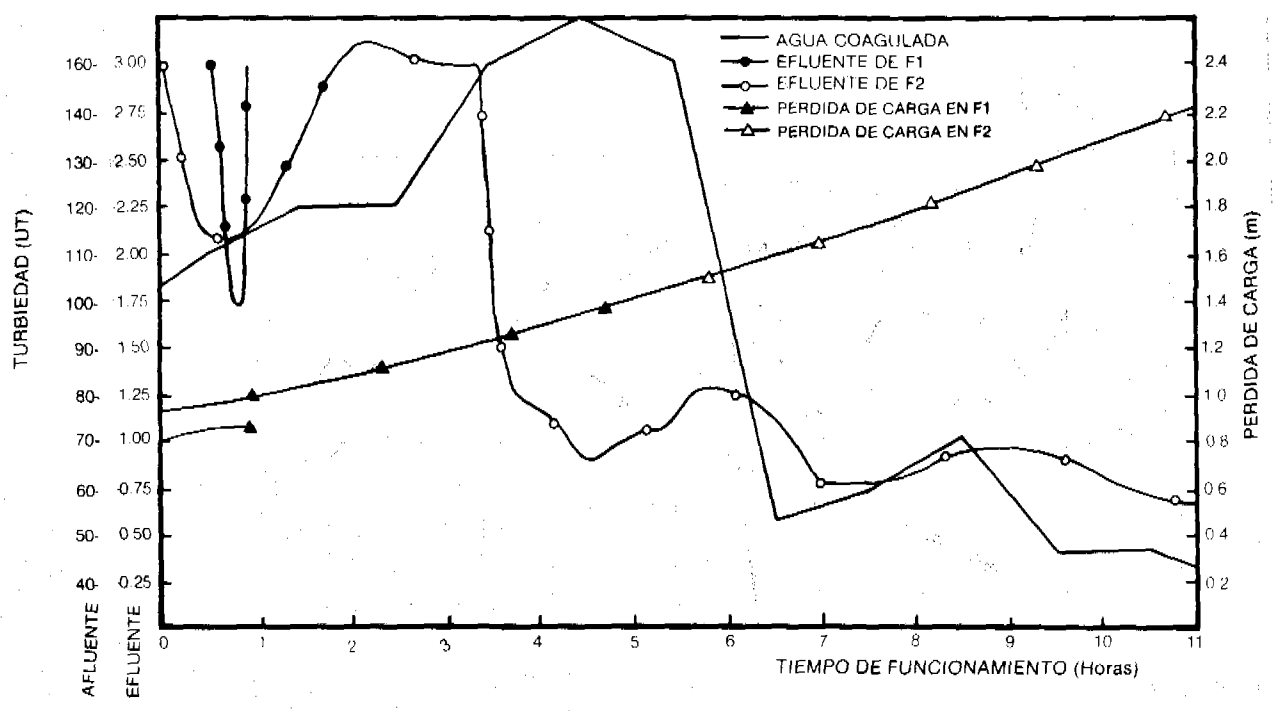


Fig. No. 4.34 - Resultados de operación. Ensayo No. 04<sup>(34)</sup>

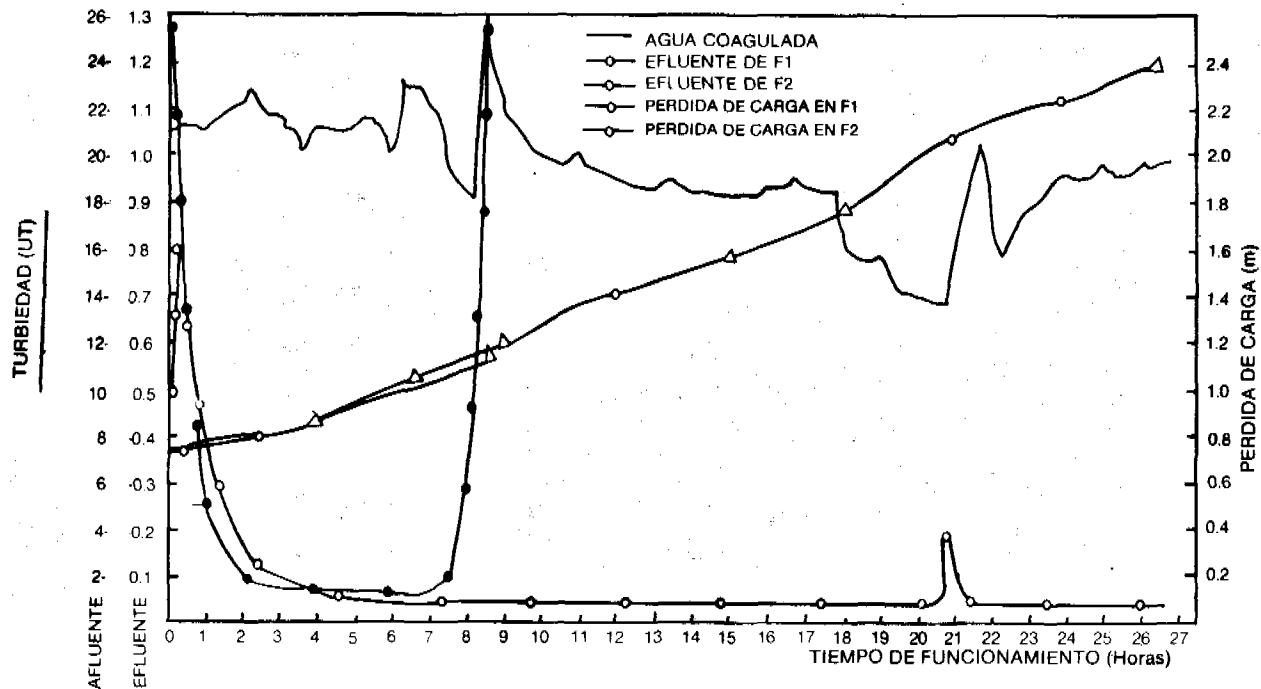


Fig. No. 4.35 - Resultados de operación. Ensayo No. 05<sup>(34)</sup>

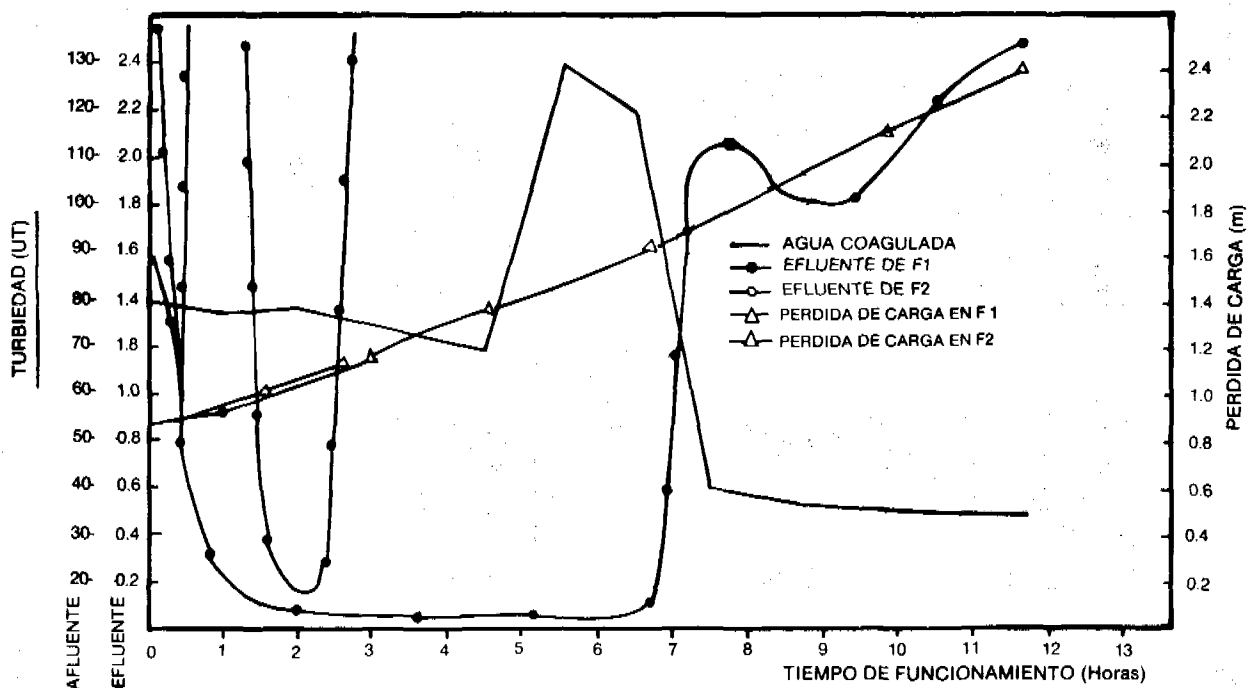


Fig. No. 4.36 - Resultados de operación. Ensayo No. 06<sup>(34)</sup>

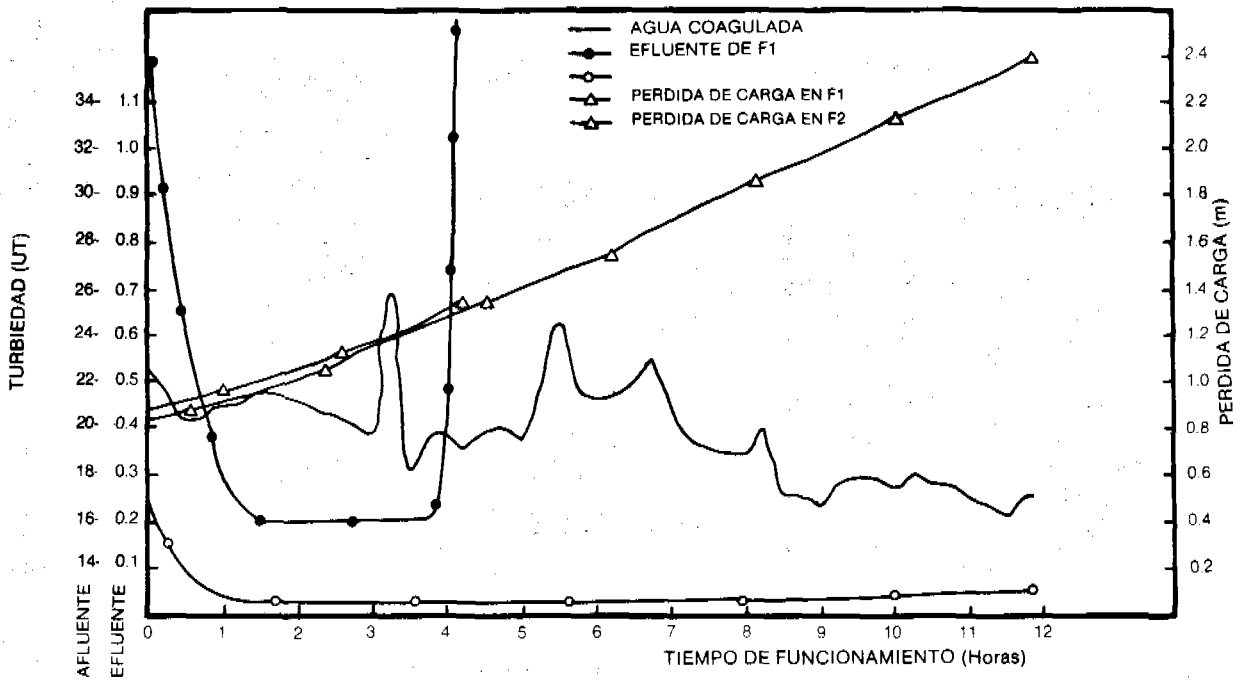


Fig. 4.37 - Resultados de operación. Ensayo No. 07 <sup>(34)</sup>

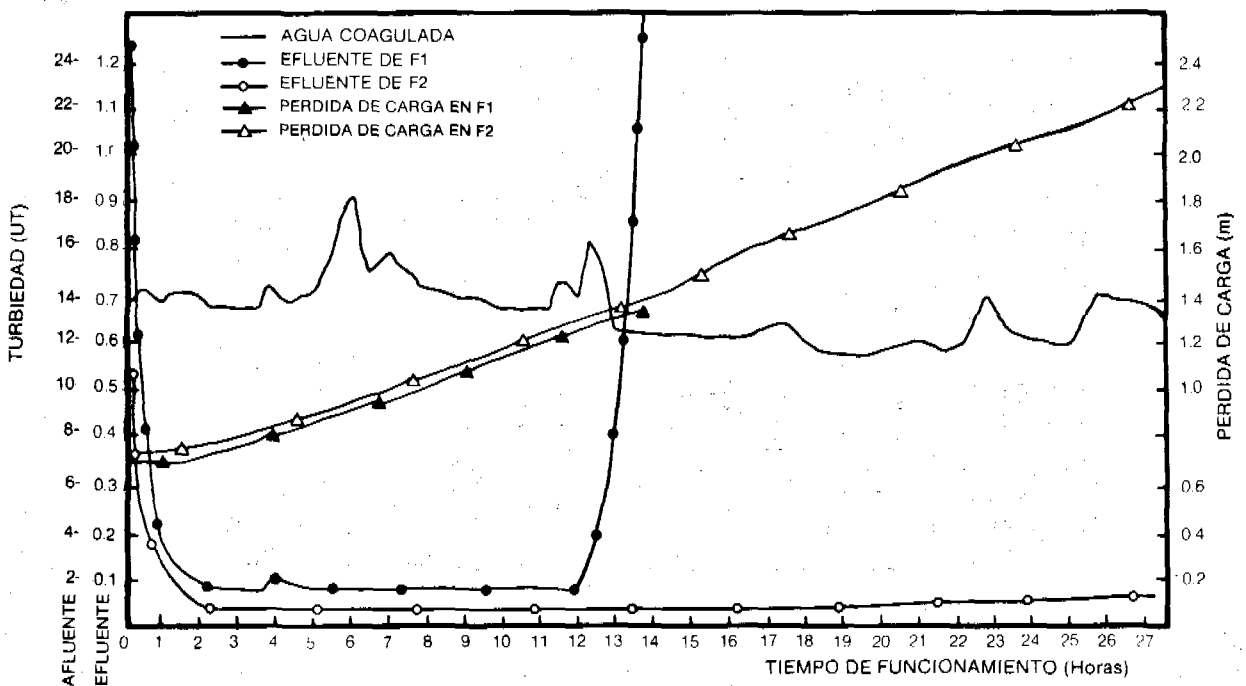
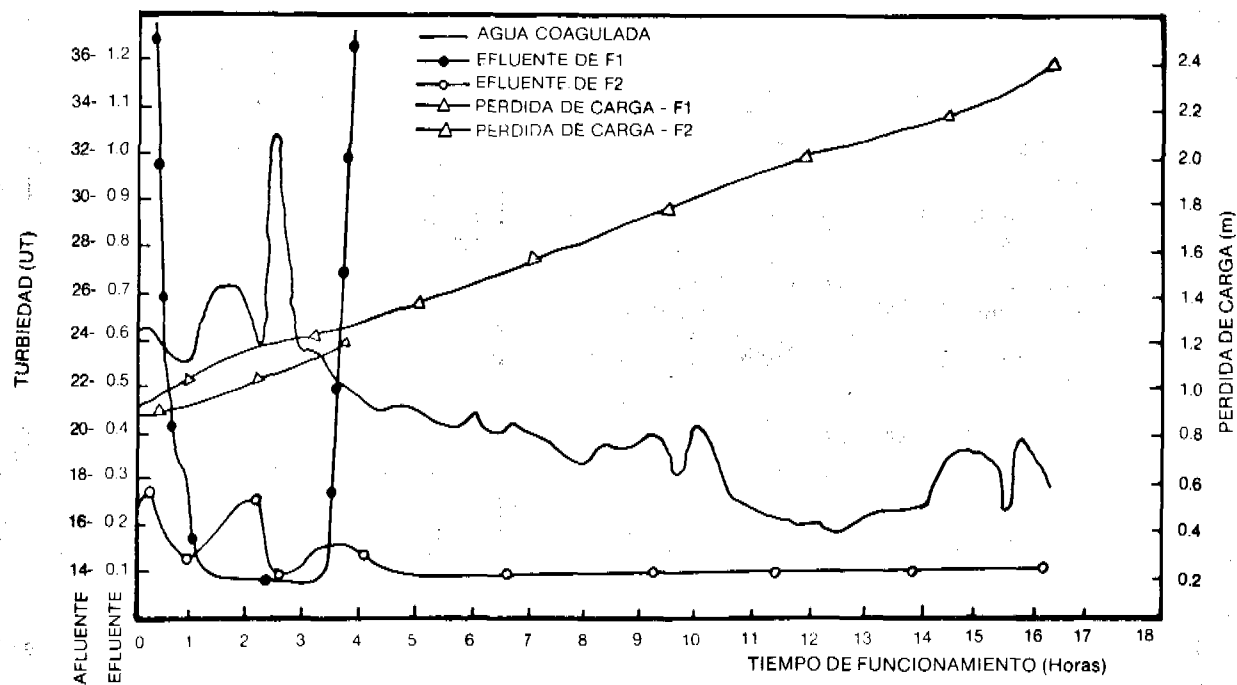
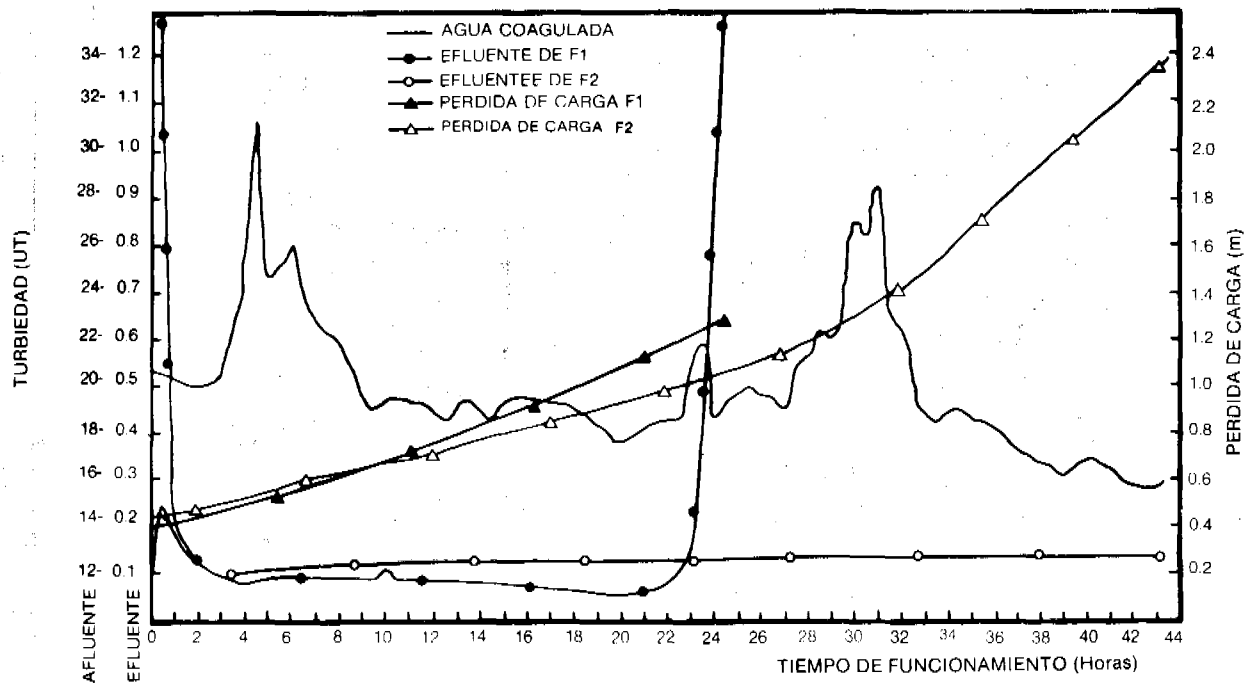


Fig. No. 4.38 - Resultados de operación. Ensayo No. 08 <sup>(34)</sup>



Estas figuras muestran cómo la utilización de almidón resulta ser una alternativa interesante, pues permite una mayor flexibilidad en la operación cuando la calidad del afluente es variable, y evita el fenómeno de saturación y ruptura del medio cuando la coagulación del agua cruda se realiza mediante el mecanismo de adsorción.

- (01) ALAERTS, G. & VAN HAUTE, A. "Stability of Colloid Types and Optimal Dosing in Water Flocculation". In: PAWLOWSKI, L., *Physicochemical Methods For Water and Wastewater Treatment*. Ed. Elsevier, 1982. p. 12-29.
- (02) AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION & ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Chicago, USA - *Polyelectrolytes Aids to Better Water Quality*. June 1972, 130 p.
- (03) AMIRTHARAJAH, A. & MILLS, Kirk M. "Rapid - mix design for mechanisms of alum coagulation". *J. AWWA*, Denver, Colorado, 74 (4): 210 - 216. Apr., 1982.
- (04) ANDREU - VILLEGAS, R. & LETTERMAN, Raymond D., "Optimizing Flocculator Power Input". *J. Environmental Eng. Div. ASCE*, 102: 251-263. Apr. 1976.
- (05) APHA, AWWA, WPCF - *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*". 16 ed. Washington, 1985. 1268 p.
- (06) ARAUJO, Roque Angélico - "Emprego da Coagulação - Flocculação na Remoção de Substâncias Húmicas (cor) de Águas para Abastecimento". São Carlos, 1985. 272 p. Dissert. (mest. hidr. san.) - Escola de Eng. de São Carlos - Univ. S. Paulo.
- (07) ARBOLEDA, J. et alii - *Polímeros Naturales y su Aplicación como Ayudantes de Flocculación*. México, XIV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria, CEPIS - Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 1974, 21 p.
- (08) ARGAMAN, Y. & KAUFMAN, W.J. - *Turbulence in Orthokinetic Flocculation*. Berkeley, Calif., USA, Federal Water Pollution Control Administration. July, 1968. 160 p.
- (09) ARGAMAN, Yerachmiel & KAUFMAN, Warren J. - "Turbulence and Flocculation". *Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE*, SA2, vol. 92, 233- 241. Apr. 1970.
- (10) ARGAMAN, Y.A. "Pilot - Plant studies of flocculation". *J. AWWA*, Denver, Colorado, 63: 775-777, 1971.
- (11) BABCOCK, D.B. e SINGER, P.C. - "Chlorination and Coagulation of Humic and Fulvic Acids". *J. AWWA*, Denver, Colorado, 71 (3): 149- 152. Mar., 1979.
- (12) BALDWIN et alii - The Relation of Starch-Iodine Absorption Spectra to the Structure of Starch and Starch Components. *Journal of the American Chemical Society*, 66 (1): 111-115. January, 1944.
- (13) BATES, F.L. et alii - Amylose and Amylopectin Content of Starches Determined by their Iodine Complex Formation. *Journal of the American Chemical Society*, 65 (2): 142-148. February, 1942.
- (14) BLACK, A.P. & CHRISTMAN, R.F. - "Characteristics of Colored Surface Waters". *J. AWWA*, Colorado, 55 (6): 753-770. June, 1963.
- (15) BLACK, A.P. & CHRISTMAN, R.F. - "Chemical Characteristic of Fulvic Acids". *J. AWWA; Colorado*, 55 (7): 897 - 912. Jul., 1963.
- (16) BLACK, A.P. & HANNAH, Sidney A. - "Electrophoretic Studies of Turbidity Removal by Coagulation With Aluminum Sulfate". *J. AWWA*, Denver, Colorado, 53 (4): 439 - 451. Apr., 1961.
- (17) BLACK, A.P. & WILLEMS, D.G. - "Electrophoretic Studies of Coagulation for Removal of Organic Color". *J. AWWA*, 53 (5): 589 - 604. May, 1961.
- (18) BLACK, A.P. et alii - "Stoichiometry of the Coagulation of Color Causing Compounds With Ferric Sulfate". *J. AWWA*. 55 (7), 897 - 912. Jul. 1963.
- (19) CAMP, Thomas R. & STEIN, P.C. - "Velocity Gradients and Internal Work in Fluid Motion", *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, vol. 30, Nº 4, pp. 219 - 237. Oct., 1943.
- (20) CAMPOS, J.R. - Ensaio sobre a Aplicação de Polieletrólitos na Flocculação de Águas de Abastecimento. São Carlos, SP, BRASIL, Universidade de São Paulo, 1972, 98 p. (Dissertação de Mestrado).
- (21) CAMPOS, J.R. e AZEVEDO NETTO, J.M. - Emprego do amido de batata como auxiliar de flocculação de águas para abastecimento, XVIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, La Paz, Bolívia, 1980.
- (22) CAMPOS J.R. et alii - Emprego do Amido de Araruta gelatinizado com hidróxido de sódio como auxiliar de flocculação de águas para abastecimento, *Revista DAE* vol. 44, Nº 136, 63-68.
- (23) CAMPOS, J.R. - Emprego do amido de batata como auxiliar de flocculação de águas para abastecimento, Tese de Doutorado apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos, Univ. de São Paulo, 1980, 179 p.
- (24) CAMPOS, J.R. e DI BERNARDO L. - Diretrizes para preparação e aplicação de suspensão de amido, Fundação para o Incremento de Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial, (não publicado).



- (25) CAMPOS, J.R. et alii - Comparacao de eficiencia de amido de diversas fontes como auxiliar de floculacao de águas para abastecimento, XVIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Panamá, Panamá, 1982.
- (26) CARRION, José M. Pérez & VARGAS, Lidia Canepa de "Procesos Unitarios - Laboratorio/Floculacion". In: OPS/EHP/CEPIS, Programa Regional OPS/EHP/CEPIS de mejoramiento de calidad de águas para consumo humano, 1981
- (27) CEPIS. Teoria, Diseño y Control de los Procesos de Clarificacion del Agua. Lima, Perú, 1973. 558 p.
- (28) CHRISTMAN, R.F. & GHASSEMI, M. - "Chemical Nature of Organic Color in Water". J. AWWA, Denver, Colorado, 58 (6): 723-741. June, 1966.
- (29) COMMITTEE REPORT - Organics Removal by Coagulation: A review and research needs". J. AWWA, Denver, Colorado, 71 (10): 588-603. Oct. 1979.
- (30) DEMPSEY, Brian A. et alii - "Polyaluminum Chloride and Alum Coagulation of Clay - Fulvic Acid Suspensions". J. AWWA, Denver, Colorado, 77 (3); 74-80. Mar., 1985.
- (31) DHARMARAJAH, Anthonisamy Herman - "Direct Filtration of Humic Substances With Alum and Polymer". Ames, 1979. 144 p. Thesis (master) - Iowa State University.
- (32) DI BERNARDO, L. et alii. Coagulacao de Águas com Turbidez ou Cor Elevada. Revista DAE, vol. 47 (150). Dez. 1987.
- (33) DI BERNARDO, L. et alii. Influencia da Realizacao de Descargas de Fundo Durante a Carreira de Filtracao no Comportamento de Sistemas de Filtracao Direta Ascendente. Revista DAE, vol. 44 (139). Dez. 1984.
- (34) DI BERNARDO, L. et alii. Coagulacao e Filtracao Direta Ascendente. Revista DAE, vol. 46 (146). Set. 1986.
- (35) DI BERNARDO, L. Comparacao entre a Filtracao Realizada em Papel de Filtro e em Instalacao Piloto de Filtracao Direta Ascendente. Revista DAE, vol. 45 (142). Set. 1985.
- (36) DI BERNARDO, Luiz - "Tratamento de águas de abastecimento de cor elevada". Revista DAE, Sao Paulo, Nº 133, 61-65. Jun. 1983.
- (37) DI BERNARDO, Luiz - Ensaio de Floculacao e Filtracao Direta - Presidente Prudente, SP, Brasil. Fundacao para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeicoamento Industrial - 1985 (nao publicado).
- (38) DI BERNARDO, Luiz - Ensaio de Floculacao - Tratamento de Agua de Taubaté S.P., Brasil. Fundacao para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeicoamento Industrial (nao publicado).
- (39) EDWARDS, Gerald A. & AMIRTHARAJAH, A. - "Removing Color Caused by Humic Acids". J. AWWA, Denver, Colorado, 77 (3): 50-57. Mar, 1985.
- (40) EDZWALD, J.K. et alii - "Polymer Coagulation of Humic Acid Waters". J. Environmental Engineering Division, 103 (EE6): 989-1000. Dec. 1977.
- (41) GATIN-GRUZENWSKA, citado por: BALDWIN, M.E. - Separation and Properties of the Two Main Components of Potato Starch. Journal of the American Chemical Society, 52 (7): 2907-2919. July, 1930.
- (42) GRIFFITH, J. David & WILLIAMS, Robert G. - "Application of Jar - Test Analysis at Phoenix, Ariz". J. AWWA, Denver, Colorado, 64 (12): 825-830. Dec., 1972.
- (43) GUPTA, V.S. et alii - "Zeta Potential Control for Alum Coagulation". J. AWWA, Denver, Colorado, 67 (1): 21-23, Jan., 1975.
- (44) HALL, Eric S. & PACKHAM, Ronald F. - "Coagulation of Organic Color With Hydrolyzing Coagulants". J. AWWA, Denver, Colorado, 57 (9): 1149-1165. Sep., 1965.
- (45) HARRIS, Howard S. et alii - "Orthokinetic Flocculation in Water Purification". Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, SA 6, vol. 92-95 - 111. Dec., 1966.
- (46) HASSID, W.Z. & McCREADY, R.M. - The Molecular Constitution of Amylose and Amylopectin of Potato Starch. Journal of the American Chemical Society, 65 (6): 1157-1161. June, 1943.
- (47) HEALY, T.W. & LaMER, V.K. - The Adsorption - Flocculation Reactions of a Polymer with and Aqueous Colloidal Dispersion. Journal of Physical Chemistry, 65 (10): 1835-1839. October, 1962.
- (48) HELLER & PUGH, citados por LaMER, V.K. & HEALY, T.W. Adsorption - Flocculation Reactions of Macromolecules at the Solid-Liquid Interface. Reviews of Pure and Applied Chemistry, 13: 112-113, 1963.
- (49) HESPANHOL, I. & SELLECK, R.E. - The Role of Polyelectrolytes in Flocculation Kinetics. Berkeley - USA, University of California, 1975, 157 p. (Tese PhD).
- (50) HIRST, E.L. et alii, citados por HASSID, W.Z. & McCREADY, R.M. - The Molecular Constitution of Amylose and Amylopectin of Potato Starch. Journal of the American Chemical Society, 65 (6): 1157-1161. June, 1943.
- (51) HUDSON, H.E. Jr. - "Physical Aspects of Flocculation" J. AWWA, Denver, Col., 57 (7): 885-892. Jul. 1965.

- (52) HUDSON, H.E. Jr. - "Evaluation of Plant Operating and Jar - Test Data". *J. AWWA*, Denver, Colorado, 65 (5): 368-375. May, 1973.
- (53) HUDSON, H.E. Jr. - "Water Clarification Processes Practical Design and Evaluation". Litton Company International Publishing, Inc., 1981.
- (54) JEFFCOAT, W. Blake & SINGLEY, J. Edward - "The Effect of Alum Concentration and Chemical - Addition Times on Coagulation". *J. AWWA*, Denver, Colorado, 67 (4): 177-181. Apr., 1975.
- (55) JIRGENSONS, B. & STRAUMANIS, M.E. - A Short Textbook of Colloid Chemistry. 2. ed. New York, the Macmillan Company, 1962. 500 p.
- (56) KAWAMURA, Susumo - "Coagulation Considerations". *J. AWWA*, Denver, Colorado, 65 (6): 417-423. Jun., 1973.
- (57) KERR, R.W. - Chemistry and Industry of Starch - 2nd Ed. Academic Press, N.Y., 1950. 715 p.
- (58) LAI, Ruay J. et alii - "Velocity Gradient Calibration of Jar - Test Equipment". *J. AWWA*, Denver, Colorado, 67 (10): 553-557. Oct., 1975.
- (59) LaMER, V.K. - Flocculation, Subsidence and Filtration of Colloidal Dispersions by Polyelectrolytes. Importance in Water Purification. The Bulletin of Engineering and Architecture, Lawrence, Kansas, 56: 31-37, 1966.
- (60) LING & NANJI, citados por: BALDWIN, M.E. - Separation and Properties of the Two Main Components of Potato Starch. Journal of the American Chemical Society, 52 (7): 2907-2919. July, 1930.
- (61) MANGRAVITE, Francis J. et alii - "Removal of Humic Acid by Coagulation and Microflotation". *J. AWWA*, Denver, Colorado, 67 (02): 88-94. Feb., 1975.
- (62) MAQUENNE, L. & ROUX, citados por: McCREADY, R.M. & HASSID, W.Z. - The Separation and Quantitative Estimation of Amylose and Amylopectin in Potato Starch. Journal of the American Chemical Society, 65 (6): 1154-1157. June, 1943.
- (63) MATIJEVIC, E. & TEZAK, B. - "Coagulation Effects of Aluminum Nitrate and Aluminum Sulfate on Aqueous Sols of Silver Halides in statu Nascendi. Detection of Polynuclear Complex Aluminum Ions by Means of Coagulation Measurements". *J. Physical Chemistry*, New York, 57: 951-954. Dec. 1953.
- (64) MATIJEVIC, E., ABRAMSON, M.B., OTTEWILL, R.H., SCHULZ, K.F. & KERKER, M. - "Adsorption of Thorium Ions on Silver Iodide Sols". *J. of Physical Chemistry*, New York, 65 (10): 1724-1729. Oct., 1961.
- (65) MATIJEVIC, E., ABRAMSON, M.B., SCHULZ, K.F. & KERKER, M. - "Detection of Metal Ion Hydrolysis by Coagulation". *J. Physical Chemistry*, New York, 64: 1157-1161. Sep., 1960.
- (66) MATIJEVIC, E., COUCH, J.P. & KERKER, M. - "Detection of Metal Ion Hydrolysis by Coagulation. IV. Zinc". *J. of Physical Chemistry*, New York, 66: 111-114. Jan., 1962.
- (67) MATIJEVIC, Egon & JANAUER, Gilbert E. - "Coagulation and Reversal of Charge of Lyophobic Colloids by Hydrolyzed Metal Ions. II. Ferric Nitrate". *J. of Colloid and Interface Science*, New York, 21: 197-223, 1966.
- (68) MATIJEVIC, E., JANAUER, G.E., & KERKER, M. - "Reversal of Charge of Lyophobic Colloids by Hydrolyzed Metal Ions I. Aluminum Nitrate". *J. of Colloid Science*, New York, 19: 333-346. 1964.
- (69) MATIJEVIC, E., MATHAI, K. G. & KERKER, M. - "Detection of Metal Ion Hydrolysis by Coagulation. V. Zirconium". *J. of Physical Chemistry*, New York, 66: 1799-1803. Oct., 1962.
- (70) MATIJEVIC, E., MATHAI, K.G., OTTEWILL, R.H. & KERKER, M. - "Detection of Metal Ion Hydrolysis by Coagulation. III. Aluminum". *J. of Physical Chemistry*, New York, 65: 826-830. May, 1961.
- (71) MATIJEVIC, E. & STRYKER, L.J. - "Coagulation and Reversal of Charge of Lyophobic Colloids by Hydrolyzed Metal Ions. III. Aluminum sulfate". *J. of Colloid and Interface Science*, New York, 22: 68-77, 1966.
- (72) McCREADY, R.M. & HASSID, W. Z. - The Separation and Quantitative Estimation of Amylose and Amylopectin in Potato Starch. Journal of the American Chemical Society, 65 (6): 1154-1157. June, 1943.
- (73) MICHAELS, A.S. & MORELCS, O. - Polyelectrolyte Adsorption by Kaolinite. Industrial & Engineering Chemistry, Cambridge, Mass. USA, 47 (9): 1801-1809. September, 1955.
- (74) MIDWOOD, R.B. & FELBECK - "Analysis of Yellow Organic Matter from Freshwater". *J. AWWA*, Denver, Colorado, 60 (3): 357. Mar., 1968.
- (75) MOORE, G.N. - Interaction of Fulvic Acids and Kaolinite during Coagulation, Presented at the 97 th annual conference of the American Water Works Association Anaheim, California. May 8 - 13, 1977.
- (76) NARKIS, N. & REBHUN, M. - "The mechanism of Flocculation Process in the presence of Humic Substances". *J. AWWA*, Denver, Colorado, 67 (2): 101-108. Feb. 1975.
- (77) PACKHAM, R.F. - "The Coagulation Process. I. Effect of pH and the Nature of the Turbidity". *J. Appl. Chem.*, 12: 556-564. Dec. 1962.

- (78) PACKHAM, R.F. - "The Coagulation Process. II. Effect of pH on the Precipitation of Aluminium Hydroxide". J. Appl Chem., 12: 564-568. Dec., 1962.
- (79) ROOK, J.J. - "Haloforms in Drinking Water". J. AWWA, Denver, Colorado, 68 (3): 168. Mar., 1976.
- (80) RUNDLE, R.E. & BALDWIN, M.E. - The Configuration of Starch and the Starch-Iodine Complex. I - The Dichroism of the Flow of Starch - Iodine Solutions. Journal of the American Chemical Society. 65 (4): 554-558. April, 1943.
- (81) SAMEC & HAERDTL, citados por: BALDWIN, M.E. - Separation and Properties of the Two Main Components of Potato Starch. Journal of the American Chemical Society, 52 (7): 2907-2919. July, 1930.
- (82) SAMEC & MAYER, citados por: BALDWIN, M.E. - Separation and Properties of the Two Main Components of Potato Starch. Journal of the American Chemical Society, 52 (7): 2907-2919. July, 1930.
- (83) SANKS, Robert L, ed. - Water Treatment Plant Desing. Michigan, Ann Arbor Science Publishers, Inc., c. 1979. 845 p.
- (84) SHERMAN & BAKER, citados por: BALDWIN, M.E. - Separation and Properties of the Two Main Components of Potato Starch. Journal of the American Chemical Society, 52 (7): 2907-2919. July, 1930.
- (85) SCHOCH T.J. - Non Carbohydrate Substances in Cereal Starches. Journal of the American Chemical Society, 64 (12): 2954-2956. December, 1942.
- (86) SCHOCH, T.J. - Froctianation of Starch by Selective Precipitation with Butanol. Journal of the American Chemical Society, 64 (12): 2957-2961. December, 1942.
- (87) SMELLIE, R.H. & LaMER, V.K. - Flocculation Subsidence and Filtration of Phosphates Slimes. VI. A Quantitative Theory of Filtration of Flocculated Suspensions. Journal of Colloid Science, New York, USA, 23: 589-599, 1958.
- (88) SMOLUCHOWSKI, M. - Versuch einer Mathematischen Theorie der Koagulation skinetik Kolloid Sosungen. Z. Physik Chem., 92: 155, 1918.
- (89) STEVENS, A.A. et al - "Chlorination of Organics in Drinking Water". J. AWWA, Denver, Colorado, 68(11): 615, Nov., 1976.
- (90) STUMM, Werner & MORGAN, James J. - "Chemical Aspects of Coagulation". J. AWWA, Denver, Colorado, 60 (5): 514-539. May, 1968.
- (91) TOLEDO, A.P.P. de - "Comunicacao Pessoal".
- (92) TOLEDO, A.P.P. de - "Contribuicao ao Estudo Físico - Químico de Acido Húmico Extraido de Sedimento". Sao Paulo, 1973, 122 p. Dissertacao (Mestrado) - Universidade de Sao Paulo.
- (93) VIK, Eilen A. et alii - "Removing Aquatic Humus From Norwegian Lakes". J. AWWA, Denver, Colorado, 77(3): 58 - 66. Mar. 1985.