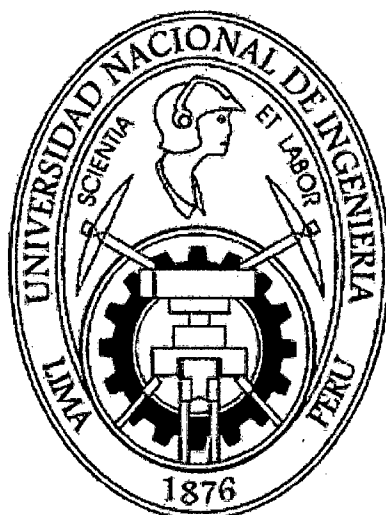


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**“USO DEL ALGINATO DE SODIO COMO  
AYUDANTE DE COAGULACIÓN EN LA  
CLARIFICACIÓN DEL AGUA”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO SANITARIO**

**PRESENTADO POR:**

**ANTAY CHIPANA GERMÁN  
CÓRDOVA CORONADO RUBI SALY**

**LIMA, PERU**

**2011**

**Digitalizado por:**

**Consortio Digital del  
Conocimiento MebLatam,  
Hemisferio y Dalse**

**DEDICO ESTA TESIS:**

A los seres que más amo en este mundo: mi madre Isabel, y mi padre Germán, por ser la fuente de mi inspiración y motivación para superarme cada día más y así poder luchar para que la vida nos depare un futuro mejor. Quienes además me han enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nunca nada a cambio.

G.A.CH.

**DEDICO ESTA TESIS:**

A mi querida madre María Coronado Fernández, quien con todo su amor y invaluable esfuerzo me acompañó y me alentó en todo momento, siendo así la gestora de mi formación integral, a mis hermanos Mersí, Martín y Mario por su constante apoyo y comprensión que me supieron brindar y a mi primo Jesús que supo darme ánimos para seguir adelante. Todos ellos han logrado que cumpla una de las metas y objetivos trazados en mi vida y estoy segura que seguirán siendo un apoyo permanente para seguir consiguiendo éxitos en el sendero que aun me queda por adelante.

R.S.C.C

## AGRADECIMIENTO

Primero y como más importante, me gustaría agradecer sinceramente a mi compañera de Tesis Rubí Saly Córdova Coronado, su esfuerzo y dedicación. Gracias a su manera de trabajar, su persistencia, su paciencia y su motivación han sido fundamentales para poder culminar la presente tesis.

También me gustaría agradecer los consejos recibidos a lo largo de los últimos años por los profesores de la Facultad de Ingeniería Ambiental, que de una manera u otra han aportado su granito de arena a mi formación. Destacar al M.S.c. Víctor Maldonado, al Ing. Otto Rosasco y al Ing. Guillermo León.

De igual manera agradecer al resto de profesores por su trato humano y su visión crítica de muchos aspectos cotidianos de la vida, que ayudan a formarte como persona e profesional.

Y por último, pero no menos importante, estaré eternamente agradecido a mis compañeras de estudio. Para mí son los mejores compañeros que se pueden tener. Su motivación y optimismo me han ayudado en momentos muy críticos de la Tesis. Los considero como mis mejores amigos y estoy orgulloso que ellos también me consideren a mi digno de poseer su amistad. No todo el mundo puede decir lo mismo de sus compañeros de estudios.

Para ellos, muchas gracias por todo.

G.A.CH

## AGRADECIMIENTO

A mi amigo el Ing. Freddy Fernández Rojas, por su continuo estímulo contribuyo a alcanzar unas de mis principales metas la culminación de mi tesis.

A mi asesor que con consejos busca siempre el perfeccionamiento técnico y científico de la investigación.

También me gustaría agradecer al laboratorio de la Facultad de Ambiental y sobre todo el apoyo profesional que me brindo Ricardo que siempre estuvo apoyándome y guiándome en los análisis de laboratorio.

Y por último a mi amigo de la universidad José Olivera Illa ya que me brindo consejos para la elaboración de mi tesis y me dio mucho optimismo.

R.S.C.C.

## ÍNDICE

CAPITULO 1.	1
1.1 RESUMEN.....	1
1.2 INTRODUCCIÓN.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	5
1.4 ANTECEDENTES .....	6
1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
1.6 JUSTIFICACIÓN .....	9
1.7 HIPÓTESIS:.....	11
CAPITULO 2.CALIDAD DEL AGUA .....	12
2.1 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA .....	12
2.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....	12
2.1.1.1 TURBIEDAD .....	12
2.1.1.2 OLOR.....	12
2.1.1.3 COLOR.....	13
2.1.1.4 TEMPERATURA.....	13
2.1.1.5 PH.....	13
2.1.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS .....	14
2.1.2.1 LA ACIDEZ .....	14
2.1.2.2 ALCALINIDAD .....	14
2.1.2.3 DUREZA .....	15
2.1.2.4 OXÍGENO DISUELTO (OD).....	15
2.1.3 CARACTERISTICAS BACTERIOLÓGICAS .....	15
2.1.3.1 BACTERIAS .....	15
2.1.3.2 VIRUS.....	16
2.1.3.3 ALGAS Y PROTOZOOS.....	17
2.1.3.4 HONGOS Y OTRO MICROORGANISMOS DEL PLANCTON .	17
CAPITULO 3. COAGULACIÓN .....	18
3.1 GENERALIDADES.....	18

3.2	COLOIDES .....	18
3.2.1	DEFINICIÓN .....	18
3.2.2	TIPOS DE SISTEMAS COLOIDALES .....	19
3.2.3	TAMAÑO .....	19
3.2.4	FORMA DE LOS COLOIDES.....	20
3.2.5	CLASIFICACIÓN DE LOS COLOIDES .....	20
3.2.6	PROPIEDADES DE LOS COLOIDES.....	22
3.2.6.1	PROPIEDADES CINÉTICAS .....	22
3.2.6.1.1	MOVIMIENTO BROWNIANO .....	22
3.2.6.1.2	DIFUSIÓN.....	22
3.2.6.1.3	PRESIÓN OSMÓTICA.....	22
3.2.6.2	PROPIEDADES ÓPTICAS.....	23
3.2.6.2.1	DISPERSIÓN DE LA LUZ.....	23
3.2.6.2.2	OPAlescENCIA.....	23
3.2.6.3	PROPIEDADES DE SUPERFICIE.....	24
3.2.6.4	PROPIEDADES ELECTROKINÉTICAS.....	24
3.2.7	ESTABILIDAD E INESTABILIDAD DE LOS COLOIDES .....	25
3.2.7.1	ESTABILIDAD .....	25
3.2.7.2	INESTABILIDAD.....	28
3.3	MECANISMOS DE DESESTABILIZACIÓN DE LOS COLOIDES .....	28
3.3.1	TEORÍA FÍSICA.....	28
3.3.1.1	COMPRESIÓN DE LA DOBLE CAPA .....	28
3.3.2	TEORÍA QUÍMICA .....	32
3.4	CINÉTICA O ETAPAS DE LA COAGULACIÓN.....	35
3.5	TIPOS DE COAGULACIÓN.....	36
3.5.1	COAGULACIÓN POR ADSORCIÓN .....	36
3.5.2	COAGULACIÓN POR BARRIDO.....	37
3.6	FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA COAGULACIÓN.....	39
3.6.1	LA CALIDAD DEL AGUA CRUDA.....	39
3.6.1.1	CONCENTRACIONES DE COLOIDES, ALCALINIDAD Y PH.....	39
3.6.2	EFEKTO DE PH .....	40
3.6.3	EFEKTO DE LAS SALES.....	40
3.6.4	EFEKTO DE LA NATURALEZA DE LA TURBIEDAD.....	40
3.6.5	EFEKTO DEL COAGULANTE .....	41

3.6.6	EFFECTO DE LA TEMPERATURA .....	41
<b>CAPITULO 4.</b>	<b>FLOCULACIÓN .....</b>	<b>42</b>
4.1	DEFINICIÓN.....	42
4.2	MECÁNICA DE FLOCULACIÓN.....	43
4.2.1	FLOCULACIÓN PERICINÉTICA O BROWNIANA .....	43
4.2.2	FLOCULACIÓN ORTOCINÉTICA O GRADIENTE DE VELOCIDAD .....	43
4.2.3	SEDIMENTACIÓN DIFERENCIAL.....	43
4.3	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FLOCULACIÓN .....	44
4.3.1	NATURALEZA DEL AGUA.....	44
4.3.2	TIEMPO DE FLOCULACIÓN .....	44
4.3.3	GRADIENTE DE VELOCIDAD.....	44
4.3.4	PARÁMETROS OPERACIONALES .....	45
4.4	TIEMPO INICIAL DE FORMACIÓN DE FLOC .....	46
4.5	TAMAÑO DEL FLOC PRODUCIDO .....	46
<b>CAPITULO 5.</b>	<b>SEDIMENTACIÓN .....</b>	<b>48</b>
5.1	DEFINICIÓN.....	48
5.2	SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS DISCRETAS. ....	48
5.3	SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS FLOCULENTAS.....	49
5.4	SEDIMENTACIÓN POR CAIDA LIBRE O INTERFERIDA. ....	49
5.5	EXPRESIONES DE VELOCIDADES.....	50
5.5.1	SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS FLOCULENTAS.....	50
5.6	FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO:.....	53
5.6.1	CALIDAD DEL AGUA:.....	53
5.6.2	FACTORES EXTERNOS. ....	54
<b>CAPITULO 6.</b>	<b>POLÍMEROS .....</b>	<b>55</b>
6.1	DEFINICIÓN:.....	55
6.2	POLIMERIZACIÓN Y ESTRUCTURA: .....	55
6.3	CLASIFICACIÓN:.....	56
6.3.1	SEGÚN SU CARGA ELÉCTRICA.....	56
6.3.1.1	POLÍMEROS NO IÓNICOS: .....	56



6.3.1.2	POLÍMEROS ANIÓNICOS:	56
6.3.1.3	POLÍMEROS CATIONICOS:	58
6.3.2	SEGÚN SU ORIGEN:	59
6.3.2.1	POLÍMEROS NATURALES:	59
6.3.2.2	POLÍMEROS SINTÉTICOS:	60
6.4	MODO DE ACCIÓN DE LOS POLÍMEROS	61
6.4.1	COMO COAGULANTES:	62
6.4.2	COMO AYUDANTE DE COAGULANTES:	62
6.4.3	COMO AYUDANTE DE FLOCULACIÓN:	62
<b>CAPITULO 7. ALGINATO DE SODIO</b>		<b>65</b>
7.1	GENERALIDADES	65
7.2	FUENTE DE OBTENCIÓN	65
7.3	ALGINATO DE SODIO	67
7.4	COMPOSICION:	68
7.5	CARACTERÍSTICAS:	70
7.6	PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS:	70
7.6.1	SOLUBILIDAD:	71
7.6.2	VISCOSIDAD:	72
7.6.2.1	EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN:	72
7.6.2.2	EFECTO DEL PH:	72
7.6.2.3	EFECTO DEL PESO MOLECULAR:	73
7.6.2.4	EFECTO DE LA TEMPERATURA:	74
7.6.2.5	FUERZA IÓNICA:	75
7.6.2.6	GRADO DE AGITACIÓN:	75
7.6.3	HUMEDAD:	75
7.7	USOS DEL ALGINATO DE SODIO:	75
7.8	ALMACENAMIENTO:	76
<b>CAPITULO 8. PARTE EXPERIMENTAL</b>		<b>77</b>
8.1	DESCRIPCIÓN Y MATERIALES DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LOS PROCESOS:	77
8.1.1	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO PARA LA PRUEBA DE JARRAS	77

8.1.2	COMPONENTES DEL EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS.....	78
8.1.2.1	SISTEMA DE DOSIFICACIÓN.....	78
8.1.2.2	SISTEMA DE AGITACIÓN:.....	80
8.1.2.3	ILUMINADOR DE FLÓCULOS: .....	82
8.1.2.3.1	DETERMINACIÓN DE LA GRADIENTE DE VELOCIDAD: .....	82
8.1.2.4	DESCRIPCIÓN DE LAS JARRAS .....	84
8.1.2.5	SISTEMA DE TOMA DE MUESTRAS .....	85
8.1.3	EQUIPO AUXILIAR:.....	86
8.1.3.1	CRONÓMETRO: .....	86
8.1.3.2	VIDRERIA:.....	87
8.1.3.3	PEACHÍMETRO: .....	87
8.1.3.4	TURBIDÍMETRO: .....	87
8.1.3.5	AGITADOR MAGNÉTICO:.....	88
8.1.3.6	BALANZA ELECTRÓNICA. ....	89
8.2	PRECAUCIONES Y LIMITACIONES: .....	90
CAPITULO 9. METODOLOGÍA DE TRABAJO:.....		91
9.1	CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS.....	91
9.2	METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS A NIVEL DE LABORATORIO.....	92
9.2.1	UTILIZACIÓN DEL ALGINATO DE SODIO PARA DIFERENTES TURBIEDADES EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN.....	92
9.2.2	PARÁMETROS ÓPTIMOS DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE.....	93
9.2.3	PARÁMETROS ÓPTIMOS DEL ALGINATO DE SODIO COMO AYUDANTE DE COAGULACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO.....	94
9.3	OBTENCIÓN DEL ALGINATO DE SODIO EN POLVO:.....	94
9.4	OBTENCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE ALGINATO DE SODIO:.....	100
9.4.1	EQUIPOS:.....	100
9.4.2	MATERIALES: .....	100
9.4.3	REACTIVOS O SUSTANCIAS A EMPLEAR: .....	100
9.4.4	PROCEDIMIENTO:.....	100
9.4.5	SUGERENCIAS:.....	102
9.5	PREPARACIÓN DE LA MUESTRA DE AGUA CRUDA: .....	102
9.6	DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA, CONCENTRACIÓN ÓPTIMA,	

PARÁMETROS DE FLOCULACIÓN, VELOCIDAD ÓPTIMA DE SEDIMENTACIÓN:.....	104
9.6.1 EQUIPOS:.....	104
9.6.2 MATERIALES: .....	104
9.6.3 REACTIVOS O SUSTANCIAS A EMPLEAR:.....	105
9.6.4 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DEL COAGULANTE: .....	105
9.6.5 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA UTILIZANDO EL COAGULANTE Y EL AYUDANTE DE COAGULACIÓN .....	110
9.6.6 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ÓPTIMA UTILIZANDO SOLO EL COAGULANTE O EL AYUDANTE DE COAGULACIÓN.....	112
9.6.7 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ÓPTIMA UTILIZANDO EL COAGULANTE Y EL AYUDANTE DE COAGULACIÓN:.....	113
9.6.8 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FLOCULACIÓN: .....	114
9.6.9 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DECANTACIÓN: .....	116
<b>CAPITULO 10. RESULTADOS DE LABORATORIO .....</b>	<b>119</b>
10.1 RESULTADO DE LA DOSIS ÓPTIMA DEL ALGINATO DE SODIO PARA DIFERENTES TURBIEDADES.....	119
10.1.1 RESULTADO DE LA DOSIS ÓPTIMA DEL ALGINATO DE SODIO PARA TURBIEDAD DE 50 UNT.....	119
10.1.2 RESULTADO DE LA DOSIS ÓPTIMA DEL ALGINATO DE SODIO PARA TURBIEDAD DE 100 UNT.....	121
10.1.3 RESULTADO DE LA DOSIS ÓPTIMA DEL ALGINATO DE SODIO PARA TURBIEDAD DE 150 UNT.....	123
10.1.4 RESULTADO DE LA DOSIS ÓPTIMA DEL ALGINATO DE SODIO PARA TURBIEDAD DE 200 UNT.....	125
10.1.5 RESULTADO DE LA DOSIS ÓPTIMA DEL ALGINATO DE SODIO PARA TURBIEDAD DE 300 UNT.....	127
10.1.6 RESULTADO DE LA DOSIS ÓPTIMA DEL ALGINATO DE SODIO	

PARA TURBIEDAD DE 400 UNT .....	129
10.1.7 RESUMEN DE RESULTADOS .....	131
10.2 RESULTADO DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE PARA UNA TURBIEDAD INICIAL DE 50 UNT.....	134
10.2.1 RESULTADO DE DOSIS ÓPTIMA DEL SULFATO DE ALUMINIO .....	134
10.2.2 RESULTADO DE PARÁMETROS DE FLOCULACIÓN .....	136
10.2.3 RESULTADO DE LOS PARÁMETROS DE DECANTACIÓN PARA TURBIEDAD INICIAL DE 50 UNT .....	142
10.3 RESULTADO DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE PARA UNA TURBIEDAD INICIAL DE 200 UNT.....	145
10.3.1 RESULTADO DE DOSIS ÓPTIMA DEL SULFATO DE ALUMINIO .....	145
10.3.2 RESULTADO DE PARÁMETROS DE FLOCULACIÓN: .....	147
10.3.3 RESULTADO DE LOS PARÁMETROS DE SEDIMENTACIÓN PARA TURBIEDAD INICIAL DE 200 UNT .....	153
10.4 RESULTADO DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DEL SULFATO DE ALUMINIO Y ALGINATO DE SODIO PARA UNA TURBIEDAD INICIAL DE 50 UNT .....	156
10.4.1 RESULTADO DE DOSIS ÓPTIMA DEL ALGINATO DE SODIO COMO AYUDANTE DE COAGULACIÓN .....	156
10.4.2 RESULTADO DE DOSIS ÓPTIMA DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE .....	158
10.4.3 RESULTADO DE LA CONCENTRACIÓN ÓPTIMA DEL ALGINATO DE SODIO COMO AYUDANTE DE COAGULACIÓN .....	160
10.4.4 RESULTADO DE PARÁMETROS DE FLOCULACIÓN PARA EL SULFATO DE ALUMINIO Y ALGINATO DE SODIO .....	162
10.4.5 RESULTADO DE LOS PARÁMETROS DE SEDIMENTACIÓN PARA EL SULFATO DE ALUMINIO Y ALGINATO DE SODIO TURBIEDAD INICIAL DE 50 UNT .....	168
10.5 RESULTADO DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DEL SULFATO DE ALUMINIO Y ALGINATO DE SODIO PARA UNA TURBIEDAD INICIAL	

DE 200 UNT .....	171
10.5.1 RESULTADO DE DOSIS ÓPTIMA DEL ALGINATO DE SODIO COMO AYUDANTE DE COAGULACIÓN .....	171
10.5.2 RESULTADO DE DOSIS ÓPTIMA DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE.....	173
10.5.3 RESULTADO DE LA CONCENTRACIÓN ÓPTIMA DEL ALGINATO DE SODIO COMO AYUDANTE DE COAGULACIÓN .....	175
10.5.4 RESULTADO DE PARÁMETROS DE FLOCULACIÓN PARA EL SULFATO DE ALUMINIO Y ALGINATO DE SODIO .....	177
10.5.5 RESULTADO DE LOS PARÁMETROS DE SEDIMENTACIÓN PARA EL SULFATO DE ALUMINIO Y ALGINATO DE SODIO PARA TURBIEDAD INICIAL DE 200 UNT .....	183
10.5.6 RESUMEN DE RESULTADOS .....	186
CAPITULO 11. EVALUACION ECONÓMICA.....	187
11.1 COSTO DE LOS INSUMOS QUÍMICOS PARA EL TRATAMIENTO EMPLEANDO SÓLO EL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE:.....	187
11.1.1 PARA LA MUESTRA DE AGUA CON TURBIEDAD DE 50 UNT	187
11.1.2 PARA LA MUESTRA DE AGUA DE TURBIEDAD DE 200 UNT	188
11.2 COSTO DE LOS INSUMOS QUÍMICOS PARA EL TRATAMIENTO EMPLEANDO EL ALGINATO DE SODIO COMO AYUDANTE DE COAGULACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO.....	188
11.2.1 PARA LA MUESTRA DE AGUA CON TURBIEDAD DE 50 UNT	188
11.2.2 PARA LA MUESTRA DE AGUA DE TURBIEDAD DE 200 UNT	189
CAPITULO 12. CONCLUSIONES .....	191
CAPITULO 13. RECOMENDACIONES.....	195
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	196

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1	Tipos de sistemas coloidales.....	19
Cuadro 2	Efecto al disminuir el tamaño de las esferas.....	24
Cuadro 3	Cuadro Índice de floculación de Willcomb .....	47
Cuadro 4	Polímeros naturales que tienen propiedades Coagulantes o floculantes.....	60
Cuadro 5	Porcentajes de ácido manurónico y ácido gulurónico, y contenido de alginato para varias especies comerciales de algas pardas .....	70
Cuadro 6	Aplicaciones del alginato de sodio .....	76
Cuadro 7	Cuadro metodología de análisis .....	91
Cuadro 8	Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad inicial de 50 UNT .....	120
Cuadro 9	Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad de 100 UNT ....	121
Cuadro 10	Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad de 150 UNT ....	123
Cuadro 11	Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad de 200 UNT ....	125
Cuadro 12	Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad de 300 UNT ....	127
Cuadro 13	Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad de 400 UNT ....	129
Cuadro 14	Resumen de turbiedades finales obtenidas para las diferentes turbiedades analizadas.....	131
Cuadro 15	Resumen de dosis óptimas del alginato de sodio al 1% para diferentes turbiedades iniciales.....	132
Cuadro 16	Dosis óptima del sulfato de aluminio para turbiedad de 50 UNT ...	135
Cuadro 17	Parámetros de floculación del sulfato de aluminio para turbiedad inicial de 50 UNT.....	136
Cuadro 18	Determinación de la velocidad óptima de decantación del $Al_2(SO_4)_3$ .....	142
Cuadro 19	Selección de la tasa de decantación del $Al_2(SO_4)_3$ para una turbiedad inicial de 50 UNT .....	144
Cuadro 20	Dosis óptima del sulfato de aluminio para turbiedad inicial de 200 UNT .....	145
Cuadro 21	Parámetros de floculación del sulfato de aluminio para turbiedad	

	inicial de 200 UNT.....	147
Cuadro 22	Determinación de la velocidad óptima de decantación del $Al_2(SO_4)_3$ .....	153
Cuadro 23	Selección de la tasa de decantación del $Al_2(SO_4)_3$ para una turbiedad inicial de 200 UNT .....	155
Cuadro 24	Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad inicial de 50 UNT .....	156
Cuadro 25	Dosis óptima del sulfato de aluminio para turbiedad inicial de 50 UNT .....	158
Cuadro 26	Concentración óptima del alginato de sodio para turbiedad inicial de 50 UNT .....	160
Cuadro 27	Parámetros de floculación del sulfato de aluminio y alginato de sodio para turbiedad inicial de 50 UNT .....	162
Cuadro 28	Determinación de la velocidad óptima de decantación del alginato de sodio como ayudante de coagulación .....	168
Cuadro 29	Selección de la tasa de decantación del $Al_2(SO_4)_3$ para una turbiedad inicial de 50 UNT .....	170
Cuadro 30	Dosis óptima del alginato de sodio como ayudante de coagulación para turbiedad inicial de 200 UNT.....	172
Cuadro 31	Dosis óptima del sulfato de aluminio para turbiedad inicial de 200 UNT .....	173
Cuadro 32	Concentración óptima del alginato de sodio como ayudante de coagulación para turbiedad inicial 200 UNT .....	175
Cuadro 33	Parámetros de floculación del sulfato de aluminio y alginato de sodio para turbiedad inicial de 200 UNT .....	177
Cuadro 34	Determinación de la velocidad óptima de decantación del $Al_2(SO_4)_3$ .....	183
Cuadro 35	Selección de la tasa de decantación del alginato de sodio como ayudante de coagulación para una turbiedad inicial de 200 UNT ..	185
Cuadro 36	Resumen de resultados utilizando el sulfato de aluminio con y sin ayudante de coagulación.....	186
Cuadro 37	Resumen de evaluación económica. ....	190

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Clasificación de los coloides.....	20
Figura 3.2	El coloide y su doble capa eléctrica .....	27
Figura 3.3	Variación del espesor de la capa difusa en relación a la alta concentración de iones.....	30
Figura 3.4	Variación del espesor de la capa difusa en relación a la baja concentración de iones.....	30
Figura 3.5	Representación esquemática para el modelo de puentes en la desestabilización de coloides mediante polímeros.....	34
Figura 3.6	Modelo esquemático del proceso de coagulación .....	36
Figura 3.7	Coagulación por adsorción.....	37
Figura 3.8	Coagulación de barrido o arrastre de partículas.....	38
Figura 4.1	Proceso de floculación.....	42
Figura 4.2	Detalle de cargas negativas realizando coagulación.....	45
Figura 4.3	Ilustración con detalle de cargas de los flóculos formados. ....	46
Figura 4.4	Comparador para estimar el tamaño del floculo producido en la coagulación (según WRA).....	47
Figura 5.1	Curva de variación de eficiencia en función de la velocidad de sedimentación.....	51
Figura 5.2	Corrientes Térmicas.....	53
Figura 5.3	Corrientes de densidad.....	54
Figura 6.1	Polielectrolitos no Iónicos .....	56
Figura 6.2	Polielectrolitos Aniónicos .....	57
Figura 6.3	Polielectrolitos Catiónicos.....	58
Figura 6.4	Modo de Acción de los Polímeros .....	63
Figura 7.1	Macrocystis Pyrifera o Sargazo (huiro) .....	66
Figura 7.2	Durvillaea antártica o Cochayuyo.....	67
Figura 7.3	Lessonia nigrescens o Huiro negro.....	67
Figura 7.4	Formula química desarrollada de los monómeros que conforman la sal sódica del ácido algínico.....	68
Figura 7.5	Formula química en forma de silla de los monómeros que conforman	



la sal sódica del ácido algínico .....	69
Figura 7.6 Configuraciones espaciales que adoptan los bloques tipo M y G ....	69
Figura 7.7 Viscosidad versus PH.....	73
Figura 7.8 Viscosidad versus Peso molecular.....	73
Figura 7.9 Viscosidad versus Temperatura .....	74
Figura 8.1 Equipo de prueba de jarras de Phips & Bird .....	77
Figura 8.2 Pipeta graduada.....	79
Figura 8.3 Jeringa hipodermica.....	79
Figura 8.4 Con la pipeta tomar la dosis ya conocida de la sustancia .....	80
Figura 8.5 Deflector o estator.....	81
Figura 8.6 Paleta mecánica .....	81
Figura 8.7 Base blanca con iluminación en ángulo recto.....	82
Figura 8.8 Ábaco de gradiente de velocidad Vs las revoluciones por minuto de un equipo de pruebas de jarras.....	83
Figura 8.9 Vaso de precipitado .....	84
Figura 8.10 Sifón con sus componentes .....	85
Figura 8.11 Manera de colocación del sifón en el vaso de precipitado .....	86
Figura 8.12 Cronómetro .....	86
Figura 8.13 Peachímetro marca CORNNING.....	87
Figura 8.14 Turbidímetro HACH 2100N .....	88
Figura 8.15 Agitador magnético .....	89
Figura 8.16 Balanza electrónica.....	89
Figura 9.1 Secado del alga. ....	95
Figura 9.2 Resultado de la molienda de las algas.....	95
Figura 9.3 Mezcla de las algas pardas y el alcohol etílico en reposo.....	96
Figura 9.4 Obtención del líquido mediante la filtración .....	97
Figura 9.5 Agregando cloruro de calcio a la solución obtenida .....	97
Figura 9.6 Pesando el carbón activado .....	98
Figura 9.7 Filtración de la solución obtenida en los matraces .....	98
Figura 9.8 Pasos para la elaboración del alginato de sodio .....	99
Figura 9.9 Pesado de alginato de sodio .....	101
Figura 9.10 Agregando alginato de sodio en polvo de forma gradual. ....	101
Figura 9.11 Mezclado de la tierra de jardín con agua. ....	103
Figura 9.12 Jarras con 2000 ml. del agua cruda .....	105

Figura 9.13	Succión de la solución de la fiola de 100ml. ....	106
Figura 9.14	Añadir el coagulante y el ayudante de coagulación en los primeros 5 segundos (mezcla rápida a 300 rpm).....	107
Figura 9.15	Proceso de Sedimentación de floculación .....	108
Figura 9.16	Proceso de Sedimentación.....	108
Figura 9.17	Toma de muestra para determinar la turbiedad.....	109
Figura 9.18	Medición de la turbiedad.....	109
Figura 9.19	Colocación del sulfato de aluminio y alginato de sodio para su aplicación. ....	110
Figura 9.20	Jarras de 2000 ml. mostrando la formación de flóculos .....	111
Figura 9.21	Fiolas con diferentes concentraciones de alginato de sodio.....	112
Figura 9.22	Procesos de floculación.....	114
Figura 9.23	Toma de muestras para la decantación .....	116
Figura 9.24	Jarras de 2000 ml mostrando lo sedimentado.....	117
Figura 9.25	Curva de variación de eficiencia en función de la velocidad de decantación.....	118
Figura 10.1	Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad inicial 50 UNT	120
Figura 10.2	Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad inicial 100 UNT .....	122
Figura 10.3	Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad inicial 150 UNT .....	124
Figura 10.4	Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad inicial 200 UNT .....	126
Figura 10.5	Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad inicial 100 UNT. ....	128
Figura 10.6	Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad inicial 400 UNT .....	130
Figura 10.7	Resumen de turbiedades finales obtenidas para las diferentes turbiedades analizadas.....	131
Figura 10.8	Resumen de dosis óptimas del alginato de sodio al 1% para diferentes turbiedades iniciales. ....	132
Figura 10.9	Dosis óptima del sulfato de aluminio para turbiedad inicial 50 UNT .....	135

Figura 10.10	Determinación del tiempo óptimo de duración de la mezcla lenta para las diferentes gradientes de velocidad.....	137
Figura 10.11	Determinación de las gradientes de velocidad para los diferentes tiempos de mezcla lenta.....	138
Figura 10.12	Recta de gradiente de velocidad para los diferentes tiempos de mezcla lenta.....	141
Figura 10.13	Determinación de la velocidad óptima de decantación para el $Al_2(SO_4)_3$ .....	143
Figura 10.14	Dosis óptima del sulfato de aluminio para turbiedad inicial 200 UNT.....	146
Figura 10.15	Determinación del tiempo óptimo de duración de la mezcla lenta para las diferentes gradientes de velocidad.....	148
Figura 10.16	Determinación de las gradientes para los diferentes tiempos de mezcla lenta.....	149
Figura 10.17	Recta de gradiente de velocidad para los diferentes tiempos de mezcla lenta.....	152
Figura 10.18	Determinación de la velocidad óptima de decantación para el $Al_2(SO_4)_3$ .....	154
Figura 10.19	Dosis óptima del alginato de sodio como ayudante de coagulación para turbiedad inicial 50 UNT .....	157
Figura 10.20	Dosis óptima del sulfato de aluminio como coagulante para turbiedad inicial 50 UNT .....	159
Figura 10.21	Concentración óptima del alginato de sodio como ayudante de coagulación. Turbiedad inicial 50 UNT .....	161
Figura 10.22	Determinación del tiempo óptimo de duración de la mezcla lenta para las diferentes gradientes de velocidad.....	163
Figura 10.23	Determinación de las gradientes de velocidad para los diferentes tiempos de mezcla lenta.....	164
Figura 10.24	Recta de gradiente de velocidad para los diferentes tiempos de mezcla lenta.....	167
Figura 10.25	Determinación de la velocidad óptima de decantación para el alginato de sodio como ayudante de coagulación .....	169
Figura 10.26	Dosis óptima del alginato de sodio como ayudante de coagulación para turbiedad inicial 200 UNT .....	172

Figura 10.27	Dosis óptima del sulfato de aluminio como coagulante para turbiedad inicial 200 UNT .....	174
Figura 10.28	Concentración óptima del alginato de sodio como ayudante de coagulación. Turbiedad inicial 200 UNT .....	176
Figura 10.29	Determinación del tiempo óptimo de duración de la mezcla lenta para las diferentes gradientes de velocidad.....	178
Figura 10.30	Determinación de las gradientes de velocidad para los diferentes tiempos de mezcla lenta.....	179
Figura 10.31	Recta de gradiente de velocidad para los diferentes tiempos de mezcla lenta.....	182
Figura 10.32	Determinación de la velocidad óptima de decantación del alginato de sodio como ayudante de coagulación .....	184

## **CAPITULO 1.**

### **1.1 RESUMEN**

El alginato de sodio es empleado en otros países como coagulante primario y/o ayudante de coagulación, porque se conocen sus propiedades coagulantes y floculantes. Sin embargo, en nuestro país no se emplea debido a su escasa información y por no contarse con estudios. Es por ello que en la presente tesis se realizaron las pruebas de jarras y análisis comparativos para obtener sus parámetros óptimos de dosificación, coagulación y decantación.

La presente investigación, no busca descubrir una nueva técnica en el tratamiento de agua, sino utilizar las técnicas de tratamiento ya conocidas con un polímero natural, con la idea de aportar al desarrollo de tecnologías adecuadas a nuestra realidad, para lo cual se presenta los resultados y conclusiones obtenidas.

El alginato de sodio es obtenido de diversos tipos de algas entre las más comunes las pardas, las cuales contienen alto porcentaje de polisacáridos (alginas), para las pruebas de laboratorio se uso el alginato de sodio de la importadora A. Tarrillo Barba S.A.

Para poder realizar esta investigación fue necesario realizar unas pruebas preliminares con 6 turbiedades de agua preparada en el laboratorio, en el rango de 50 UNT a 400 UNT, posteriormente se escogió las turbiedades de 50 UNT y 200 UNT tomando en cuenta las turbiedades con las que se trabajan en la planta de tratamiento de agua potable de La Atarjea. Con los dos tipos de agua seleccionadas se procedió a analizar el alginato de sodio como ayudante de coagulación del sulfato de aluminio.

Las dos muestras empleadas fueron caracterizadas antes y después de cada proceso, para determinar la calidad de agua se consideró fundamentalmente: la turbiedad, temperatura, pH, alcalinidad y dureza total.

En las muestras de agua con turbiedad de 50 UNT y 200 UNT utilizando solo el sulfato de aluminio, el tiempo óptimo de floculación obtenido para ambas fue de 25 minutos resultando una turbiedad final de 2,09 UNT para la muestra

de turbiedad 50 UNT y 2,31 UNT para la muestra de turbiedad 200 UNT. Para ambas muestras empleando además del coagulante el alginato de sodio, el tiempo óptimo de floculación fue de 20 minutos resultando una turbiedad final de 0.94 UNT para la muestra de turbiedad 50 UNT y una turbiedad final de 1.28 UNT para la muestra de turbiedad 200 UNT. Observándose que en ambos casos utilizando el ayudante de coagulación, se logró disminuir el tiempo de floculación. Por lo tanto, con este menor tiempo de floculación permite obtener unidades de menor volumen.

En las muestras de agua analizadas empleando el ayudante de coagulación se obtuvo un incremento en la tasa de decantación, es decir para la muestra de agua con turbiedad de 50 UNT empleando el ayudante de coagulación se obtuvo una tasa de decantación  $35,5 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$  en cambio empleando solo el sulfato de aluminio la tasa de decantación es  $27 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ , lográndose un incremento en la tasa de decantación de 31,48% y para la muestra con turbiedad de 200 UNT empleando el ayudante de coagulación se obtuvo una tasa de decantación  $34 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$  en cambio empleando solo el sulfato de aluminio como coagulante primario la tasa de decantación es  $22 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ , lográndose un incremento en la tasa de decantación de 54,55%, permitiéndonos obtener decantadores de menor volumen.

Si bien es cierto que en ambas muestras de agua analizadas, empleando el ayudante de coagulación se logra una mejor remoción de la turbiedad, con respecto a los costos para la turbiedad de 50 UNT utilizando solo sulfato de aluminio se obtiene un costo de 30 S./1000m<sup>3</sup> en cambio empleando el alginato de sodio como ayudante de coagulación se obtiene un costo de 210 S./1000m<sup>3</sup> y para la turbiedad de 200 UNT utilizando solo sulfato de aluminio se obtiene un costo de 45 S./1000m<sup>3</sup> en cambio empleando el alginato de sodio como ayudante de coagulación se obtiene un costo de 225 S./1000m<sup>3</sup>.

Lo cual nos demuestra que el costo del empleo del alginato de sodio como ayudante de coagulación en ambas muestras de agua son mayores que si solo se usara el sulfato de aluminio lo que genera que no sea competitivo su uso, debido a que en el Perú no se fabrica alginato de sodio a gran escala sino que es importado haciendo que su costo sea elevado.

## 1.2 INTRODUCCIÓN

La utilización de polielectrolitos en el tratamiento de agua data desde la antigüedad, algunas referencias en sánscrito mencionan que una goma extraída de las semillas del árbol del Nirmalí 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.

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.

La introducción de un nuevo producto sintético o natural en el tratamiento de agua, siempre exige gran responsabilidad por parte de las autoridades sanitarias, debido a que por bueno que sea el control de las operaciones y de los procesos involucrados, 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 la salud pública. Además, como los polímeros naturales, en la mayoría de los casos, se obtienen fácilmente sin la utilización de procesos químicos complejos, siendo más atractivo su empleo que los polímeros sintéticos, considerando, el aspecto económico.

Actualmente se conocen muchos productos naturales que presentan características de polielectrolitos, tales como: compuesto de celulosa, almidones y derivados, polisacáridos, alginato (extraído de algas marinas pardas), goma extraída de cactus (*Opuntia Ficus*), gelatina común, goma de Guar (de la semilla de *Cyanopsis Psoralliodes*), etc.

El alginato de sodio es un polímero natural que se obtiene de las algas pardas, que crecen en las costas peruanas siendo esto ventajoso para la obtención de la materia prima. Para obtener el alginato de sodio se lleva a

cabo a través de procesos físicos <sup>(1)</sup> y químicos <sup>(2)</sup>. Una vez obtenido el alginato de sodio en polvo se procedió a la preparación de la solución de la misma con agua destilada y la ayuda de un agitador magnético para que la solución sea homogénea.

La tesis realizada nos va a permitir desarrollar aun más las técnicas ya conocidas para la clarificación del agua con un polímero natural; con la idea de aportar al desarrollo de tecnologías adecuadas a nuestra medio, haciendo uso de los recursos existentes en el país.

---

<sup>(1)</sup> Procesos Físicos que involucran: lavado de las algas, secado, molienda, tamizado, uso del lixiviado, maceración, filtración y separación por centrifugación.

<sup>(2)</sup> *Procesos químicos se agregaron sustancias como: Cloruro de calcio al 10%, carbón activado, ácido clorhídrico al 0.1N y carbonato de sodio al 4%*



### 1.3 **OBJETIVOS**

#### **OBJETIVO GENERAL**

Determinar la viabilidad técnica y económica del alginato de sodio *como ayudante de coagulación del sulfato de aluminio dando a conocer una nueva alternativa en el tema de los coagulantes y/o ayudantes de coagulación natural, aportando al desarrollo de tecnologías adecuadas a nuestra realidad.*

#### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Determinar la eficiencia en la clarificación del agua empleando el alginato de sodio como ayudante de coagulación del sulfato de aluminio.
- Realizar un análisis comparativo del costo al emplear el sulfato de aluminio más alginato sodio como ayudante de coagulación y el costo de utilizar solo el sulfato de aluminio como coagulante primario.
- Validar el uso del alginato de sodio en el tratamiento de agua para consumo humano, así como la metodología utilizada en la preparación de la solución del alginato de sodio.

#### 1.4 ANTECEDENTES

En varios países latinoamericanos a inicios de la década de los setenta, se *adoptaron nuevas tecnologías de tratamiento de agua potable para países en vía de desarrollo*. Estos nuevos procedimientos indicaron la necesidad de utilizar coagulantes naturales locales que pudieran disminuir en parte ó en su totalidad el consumo de reactivos químicos importados.

Por otro lado a mediados de la década del 70, en Australia, existía el problema de que las aguas superficiales contenían alto contenido de color y turbiedad antes de que el agua pase a la etapa de desinfección, así como el costo elevado que demandaba la potabilización del agua. Debido a ello se desarrollaron nuevas técnicas de clarificación del agua para remover lo antes mencionado en este caso se desarrolló un nuevo proceso de clarificación denominado SIROFLOC. El cual consiste en agregar magnetita al agua en ciertas condiciones, luego el agua es pasada por un magneto y posteriormente es sedimentado, en el Perú se desarrolló una tesis de uso de la Magnetita Natural como coagulante en la clarificación del Agua esta fue desarrollada por la Ing. Liliana Gamarra León y el Ing. Arturo Zapata Payco y les valió de tesis para optar el título profesional de Ingeniero Sanitario en la Universidad Nacional de Ingeniería.

Asimismo en la Universidad Nacional de Ingeniería de la ciudad de Managua, Nicaragua se está desarrollando la línea de investigación de Coagulantes Naturales Alternativos desde 1992, la cual se inició con la identificación y clasificación botánica de plantas nativas con potenciales propiedades aglutinantes. Este trabajo corresponde a la siguiente etapa de investigación de este proyecto, que consiste en la obtención del polímero natural y su *aplicación en el proceso de clarificación de agua*.

En la extracción de alginatos a partir de las algas pardas, los primeros estudios datan del siglo XIX mediante los estudios del químico británico E. C. Stanford, quien encontró que la sustancia que denominó alginato poseía

varias propiedades interesantes como espesante, formador de geles y de películas, a partir de estos estudios él propuso varias aplicaciones industriales aunque la producción a gran escala fue desarrollada mucho después, Krefting (1896) obtuvo ácido algínico puro, e investigadores posteriores determinaron muchas de las propiedades de las sales de este ácido. Sin embargo, la producción comercial de alginatos no comenzó hasta el año 1929 y tuvo un notable incremento después de la segunda guerra mundial con la instalación de empresas extractoras en todo el mundo, la continuación de la investigación y su ampliación dio lugar a una gran cantidad de datos sobre la estructura del ácido algínico, las propiedades de sus soluciones y las reacciones químicas de los alginatos.

En nuestro país se desarrolló en el año 1975 una investigación sobre Polímeros Naturales y su Aplicación como Ayudantes de Floculación desarrollado por los investigadores Dr. Cliff J. Kirchmer y el Ing. Jorge Arboleda V. En la que se da cuenta de experimentos desarrollados con el Alginato de Sodio entre otros productos naturales como almidones y Opuntia Ficus - Indica.

Asimismo existe un estudio en el año 1976 dado a conocer por la investigadora de la Universidad de Chile Ana María Sancha Fernández donde presenta los resultados obtenidos de un estudio experimental sobre tratamiento de agua del río Maipú usando como ayudante de coagulación Alginato de Sodio obtenido de algas Phaeophyceas ( huiro, cochayuyo).

## 1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente en las plantas de tratamiento de agua potable que existen en nuestro país, generalmente se emplean para la remoción de la turbiedad polímeros sintéticos y productos químicos (sulfato de aluminio, el policloruro de aluminio, el cloruro férrico, entre otros). Pero por más eficiente que sea el control de las operaciones y los procesos involucrados el agua tratada contiene residuos que serán ingeridos, lo cual genera un riesgo potencial para la salud de los consumidores.

El uso de polímeros sintéticos y productos químicos en lugares de difícil acceso constituye una desventaja, por el incremento en los costos para transportar el producto.

Para la obtención del polímero natural alginato de sodio se utilizan como materia prima a las algas pardas, que son de fácil obtención debido a su abundancia en las costas peruanas.

El alginato de sodio posee propiedades coagulantes y floculantes, se desconoce su eficiencia como coagulante primario y/o ayudante de coagulación, es decir no existe bibliografía abundante que pueda sustentar su uso a gran escala.

## 1.6 JUSTIFICACIÓN

Si bien es cierto el uso de polímeros sintéticos y productos químicos empleados por las EPS de nuestro país son buenos agentes en la remoción de la turbiedad, sin embargo, se puede mejorar dicha eficiencia empleándose un ayudante de coagulación como el polímero natural "Alginato de Sodio" dando así a conocer una alternativa en el tema de los coagulantes y/o ayudantes de coagulación natural.

Con la presente tesis: "Uso del Alginato de Sodio como ayudante de coagulación en la clarificación del agua", no se busca descubrir una nueva técnica en el tratamiento de agua, sino utilizar las técnicas de tratamiento ya conocidas con un polímero natural, con la idea de aportar al desarrollo de tecnologías adecuadas a nuestra realidad.

La introducción de un producto natural en el tratamiento de agua exige gran responsabilidad por parte de las autoridades sanitarias <sup>(3)</sup>, es por eso que para poder utilizar el alginato de sodio en la clarificación del agua, debemos conocer los parámetros óptimos de dosificación, coagulación, floculación y decantación para la remoción de la turbiedad y analizar si es viable técnica y económicamente el empleo de dicho polímero natural.

Para la obtención del alginato de sodio, ya sea por elaboración propia o comprar directa del producto ya procesado <sup>(4)</sup>, lo que facilita su transporte y almacenamiento <sup>(5)</sup>. Tomando en consideración que el producto no debe

---

<sup>(3)</sup> Por la importancia a la salud y a la economía del sistema de tratamiento de agua para consumo humano

<sup>(4)</sup> El alginato de sodio deshidratado, cuya presentación se da en polvo fibroso o granulado, casi inodoro, de color blanco o amarillento

<sup>(5)</sup> El almacenamiento del alginato de sodio, de acuerdo a la experiencia en el presente trabajo.

almacenarse o transportarse a temperaturas mayores a 25°C y deben estar en lugares frescos, libres de humedad.

Con la utilización de este polímero natural se mejorará la eficiencia en la coagulación, floculación y decantación permitiéndonos contar con unidades de tratamiento de menor área, siendo aconsejable en lugares donde no se dispone de mucha área para la construcción de dicha planta de tratamiento de agua potable.

**1.7 HIPÓTESIS:**

El alginato de sodio empleado como ayudante de coagulación contribuye a la clarificación de las aguas para consumo humano, al optimizar el proceso de coagulación va a mejorar la remoción de la turbiedad, lo cual aminora el tiempo de floculación e incrementa la tasa de decantación, lo que puede permitirnos tener unidades de menor volumen.

El empleo del alginato de sodio es viable técnica y económicamente, lo cual nos permite innovar su uso en las plantas de tratamiento de agua potable, aportando al desarrollo de tecnologías adecuadas a nuestra realidad.

## **CAPITULO 2. CALIDAD DEL AGUA**

### **2.1 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA**

En la naturaleza el agua contiene muchos compuestos en estado coloidal o disueltos los cuales provienen de las más diversas fuentes, tales como la erosión de los suelos y rocas; reacciones de disolución y precipitación que ocurren bajo la superficie de la tierra y también de los efectos que resultan de las actividades del hombre.

Muchos de los elementos o compuestos que se encuentran en el agua se desvirtúan su condición original tanto desde el punto de vista físico como del punto de vista químico.

#### **2.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

Se entienden por características físicas, aquellas que en general se pueden percibir por los órganos sensoriales del hombre y pueden clasificarse en turbiedad, color, olor, sabor, temperatura, y PH.

##### **2.1.1.1 TURBIEDAD**

Es la principal característica física. Se denomina así al fenómeno que se produce al incidir sobre las partículas o coloides un haz de luz, este es dispersado en cantidades directamente proporcionales a la presencia de los coloides, dependiendo del tamaño y cantidad de los mismos.

La turbiedad del agua se debe esencialmente a materias en suspensión, tales como arcilla y otras sustancias inorgánicas finamente divididas, o materias similares y organismos microscópicos.

##### **2.1.1.2 OLOR**

El olor del agua obedece fundamentalmente a la presencia de sustancias orgánicas. Algunos olores señalan el aumento de la actividad biológica; otros pueden originarse de la contaminación industrial.

Las aguas de uso potable deben estar exentas de olor, al igual que el color.



### **2.1.1.3 COLOR**

Esta característica del agua puede estar ligada a la turbiedad o presentarse independientemente de ella.

Aún no es posible establecer las estructuras químicas fundamentales de las especies responsables del color. Esta característica del agua se atribuye comúnmente a la presencia de taninos, lignina, ácidos húmicos, ácidos grasos y ácidos fúlvicos etc. Se considera que el color natural del agua, excluyendo el que resulta de descargas industriales, puede originarse por las siguientes causas:

- La extracción acuosa de sustancias de origen vegetal;
- La descomposición de la materia;
- La materia orgánica del suelo;
- La presencia de hierro, manganeso y otros compuestos metálicos; y
- Una combinación de los procesos descritos.

### **2.1.1.4 TEMPERATURA**

Es uno de los parámetros físicos más importantes en el agua, pues por lo general influye en el retardo o aceleración de la actividad biológica, la absorción de oxígeno, la precipitación de compuestos, la formación de depósitos, la desinfección y los procesos de mezcla, floculación, sedimentación y filtración.

Está determinado por múltiples factores, principalmente ambientales, que la hacen que varíe continuamente.

### **2.1.1.5 PH**

El pH es importante porque influye en algunos fenómenos que ocurren en el agua, como la corrosión y las incrustaciones en las redes de distribución.

Aunque podría decirse que no tiene efectos directos sobre la salud, sí puede influir en los procesos de tratamiento del agua, como la coagulación y la

desinfección.

Por lo general, las aguas naturales (no contaminadas) exhiben un pH en el rango de 5 a 8.5. Las variaciones repentinas de pH representan contaminaciones debidas a descargas industriales ácidas o básicas.

### **2.1.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS**

El agua, como solvente universal, puede contener cualquier elemento de la tabla periódica. Sin embargo, pocos son los elementos significativos para el tratamiento del agua cruda con fines de consumo o los que tienen efectos en la salud del consumidor.

#### **2.1.2.1 ACIDEZ**

La acidez en agua puede definirse como su capacidad para neutralizar bases o como su capacidad para reaccionar con iones hidroxilos.

La determinación de la acidez es de importancia en la Ingeniería Sanitaria por las características corrosivas (debidas principalmente a la presencia de  $\text{CO}_2$ ) de las aguas ácidas y al costo que supone la remoción y el control de las sustancias que producen corrosión. La acidez también interfiere en diferentes procesos biológicos.

#### **2.1.2.2 ALCALINIDAD**

Es la capacidad del agua de neutralizar ácidos. Sin embargo, aniones de ácidos débiles (bicarbonatos, carbonatos, hidróxido, sulfuro, bisulfuro, silicato y fosfato) pueden contribuir a la alcalinidad.

La alcalinidad está influenciada por el pH, la composición general del agua, la temperatura y la fuerza iónica.

La alcalinidad es importante en el tratamiento del agua porque reacciona con coagulantes hidrolizables (como sales de hierro y aluminio) durante el proceso de coagulación. Además, este parámetro tiene incidencia sobre el carácter corrosivo o incrustante que pueda tener el agua y, cuando alcanza niveles altos, puede tener efectos sobre el sabor.

### **2.1.2.3 DUREZA**

La dureza depende de los contenidos de cal y magnesio que vienen disueltos en el agua por su elevado poder disolvente.

Aún no se ha definido si la dureza tiene efectos adversos sobre la salud. Pero se la asocia con el consumo de más jabón y detergente durante el lavado.

Un agua dura puede formar depósitos en las tuberías y hasta obstruirlas completamente. Esta característica física es nociva, particularmente en aguas de alimentación de calderas, en las cuales la alta temperatura favorece la formación de sedimentos.

### **2.1.2.4 OXÍGENO DISUELTO (OD)**

Su presencia es esencial en el agua; proviene principalmente del aire. La presencia del oxígeno en las aguas subterráneas se debe al agua de lluvia, la cual retiene este elemento, atraviesa el terreno hasta llegar a los mantos acuíferos, en donde se mantiene constante el nivel de oxígeno, mientras que en las aguas superficiales los contenidos cambian continuamente debido a variaciones de temperaturas externas, al movimiento del agua, a fenómenos fotosintéticos.

## **2.1.3 CARACTERÍSTICAS BACTERIOLÓGICAS**

El agua es un elemento que recibe las más distintas formas de microorganismos provenientes del suelo, del aire, de las aguas residuales, de las aguas de desechos, de las aguas cloacales, etc. En donde muchos de estos microorganismos formarán una microflora natural, mientras el resto desaparecen debido a condiciones adversas o desfavorables a su desarrollo. Sin embargo, no se puede decir que existe una microflora específica, que dependerá de factores de orden físico o químico existentes en dichas aguas.

Entre los organismos presentes en el agua tenemos:

### **2.1.3.1 BACTERIAS**

La presencia de bacterias en el agua, es mucho más predominante que la de otros tipos de microorganismos y de acuerdo a su origen se agrupa en tres

tipos:

a) Bacterias del agua propiamente dichas

Llamadas también bacterias naturales, tienen poca importancia sanitaria ya que no son patógenas ni para el hombre ni para los animales.

b) Bacterias del suelo

Las bacterias del suelo no son patógenas para el hombre, pero producen inconvenientes en las plantas de tratamiento o en las redes de distribución.

c) Bacterias de origen intestinal

Son patógenas y por lo tanto son las de mayor importancia desde el punto de vista sanitario.

Aparte de las bacterias patógenas mencionadas se tiene también dentro de esta clasificación a las bacterias que alberga y elimina diariamente el intestino humano y de los animales y que aunque no son estrictamente patógenas son importantes porque se constituyen como prueba de contaminación por materia fecal. Los principales representantes de este tipo de bacterias son:

- Bacilos Gram Positivos.
- Bacilos Gram Positivos
- Cocobacilos Gram Negativos

#### 2.1.3.2 **VIRUS**

Los virus son moléculas de ácido nucleico que pueden penetrar en las células y replicarse en ellas. Son acelulares y están constituidos por ácido nucleico y por proteínas.

El grupo más importante es el de los Enterovirus, de esta familia se han detectado que en el agua están los Picornavirus, los Reovirus, los Adenovirus y los Papovirus.

Los virus entéricos se multiplican en el intestino del hombre y son excretados

en gran número en las heces de los individuos infectados. Dentro de este grupo de virus esta el agente responsable de la hepatitis infecciosa, poliomielitis y a los responsables de enfermedades gastrointestinales virales.

#### **2.1.3.3 ALGAS Y PROTOZOOS**

Las algas y los protozoos son los microorganismos del agua por excelencia, con poblaciones abundantes y con una gran variedad. Las poblaciones de algas se caracterizan por su tremenda fluctuación con respecto a la disponibilidad de nutrientes, temperatura y a la estación del año.

Un protozoo patógeno es la Entamoeba Histolytica causante de la disentería bacilar, que también es transmitida a través del agua contaminada.

#### **2.1.3.4 HONGOS Y OTRO MICROORGANISMOS DEL PLANCTON**

Los hongos acuáticos son poco conocidos, con la excepción de algunos patógenos de peces. Los hongos invasores del agua provienen de varias fuentes, pero siempre existe una población nativa que se alimenta de la materia orgánica presente. En algunas ocasiones, los hongos forman crecimiento filamentoso en el agua corriente casi siempre en cultivos mixtos con algas y bacterias.

## **CAPITULO 3. COAGULACIÓN**

### **3.1 GENERALIDADES**

La coagulación tiene por objeto desestabilizar las partículas que se encuentran en el agua en suspensión o en estado coloidal. Este proceso es resultado de dos fenómenos:

- El primero, esencialmente químico, consiste en las reacciones del coagulante con el agua y la formación de especies hidrolizadas con carga positiva. Este proceso depende de la concentración del coagulante y el pH final de la mezcla.
- El segundo, fundamentalmente físico, consiste en el transporte de especies hidrolizadas para que hagan contacto con las impurezas del agua.

Este proceso es muy rápido, toma desde décimas de segundo hasta cerca de 10 segundos, de acuerdo con las demás características del agua: pH, temperatura, cantidad de partículas, etc. Se lleva a cabo en una unidad de tratamiento denominada mezcla rápida. De allí en adelante, se necesitará una agitación relativamente lenta, la cual se realiza dentro del floculador. En esta unidad las partículas chocarán entre sí, se aglomerarán y formarán otras mayores denominadas flóculos; estas pueden ser removidas con mayor eficiencia por los procesos de sedimentación, flotación o filtración rápida.

La remoción de las partículas coloidales está relacionada estrictamente con una adecuada coagulación, pues de ella depende la eficiencia de las siguientes etapas: floculación, sedimentación y filtración.

### **3.2 COLOIDES**

#### **3.2.1 DEFINICIÓN**

El coloide es también llamada dispersión coloidal, se basa en el tamaño de las partículas que lo forman, llamadas micelas. Poseen un tamaño bastante

pequeño, tanto que no pueden verse con los mejores microscopios ópticos, aunque son mayores que las moléculas ordinarias.

En las dispersiones coloidales se distinguen dos partes:

- Fase dispersa: las llamadas micelas.
- Fase dispersante: en las que están dispersas las partículas coloidales.

### 3.2.2 TIPOS DE SISTEMAS COLOIDALES

En la actualidad se sabe que cualquier sustancia, puede alcanzar el estado coloidal, ya que la fase dispersante como la fase dispersiva, pueden ser un gas, un líquido o un sólido, excepto que ambos no pueden estar en estado gaseoso por que todos los gases son insolubles entre sí, son posibles ocho sistemas coloidales:

Cuadro 1 Tipos de sistemas coloidales

Medio de dispersión	Fase dispersa	Nombre	Ejemplos
Gas	Líquido	Aerosol líquido	Niebla, nubes,
	Sólido	Aerosol sólido	Polvo, humo.
Líquido	Gas	Espuma	Espumas (de jabón, cerveza, etc.), nata batida.
	Líquido	Emulsión	Leche, mayonesa.
	Sólido	Sol	Pinturas, tinta china, goma arábica, jaleas
Sólido	Gas	Espuma sólida	Piedra pómez.
	Líquido	Emulsión sólida	Mantequilla, queso.
	Sólido	Sol sólido	Algunas aleaciones, piedras preciosas coloreadas

### 3.2.3 TAMAÑO

Las partículas coloidales en el agua por lo general presentan un diámetro entre 1 y 1000 milimicrómetros y su comportamiento depende de su naturaleza y origen. Estas partículas presentes en el agua son las principales responsables de la turbiedad. Son mayores que los átomos y moléculas, pero son lo suficientemente pequeñas para pasar por los poros de los filtros

ordinarios, por tanto no pueden separarse de una fase dispersante por filtración.

### 3.2.4 FORMA DE LOS COLOIDES

La forma de los coloides tiene relación directa con sus propiedades. Sin embargo, no se ha hecho clasificación adecuada de las formas coloidales. Algunos los clasifican en isométricas y anisométricas. Las primeras son las que tienen una dimensión igual en todas direcciones (esferas, poliedros); las segundas son las que se extienden preferentemente en una o dos dimensiones tales como cilindros, láminas y cintas, etc.

En un líquido turbulento, las formas filamentosas o cilíndricas tienen más oportunidad de contacto que las formas esféricas o poliédricas, lo cual influencia la posibilidad de aglutinación de las partículas y la rata de floculación.

### 3.2.5 CLASIFICACIÓN DE LOS COLOIDES

Sin pretender dar una clasificación completa de los sistemas coloidales podríamos dividirlos como indica la figura en moleculares y no moleculares (micelares); liofílicos y liofóbicos, diurnos y caducos, orgánicos e inorgánicos.

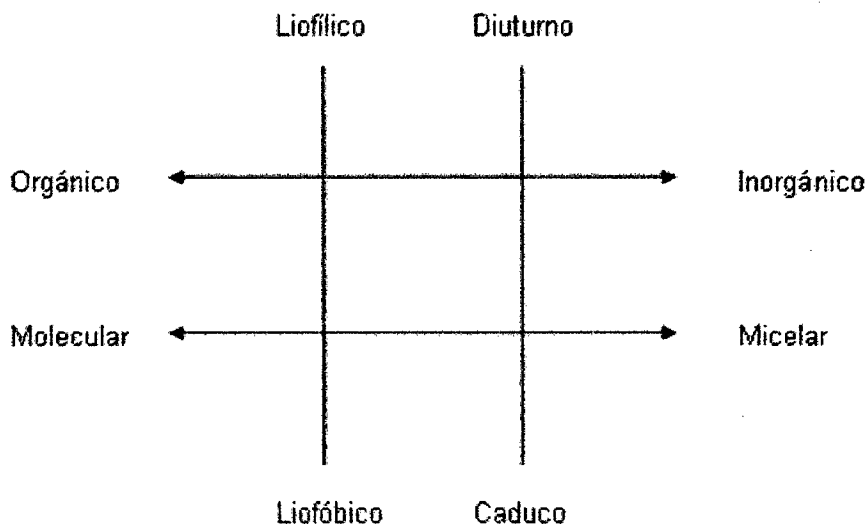


Figura 3.1 Clasificación de los coloides



**Los coloides moleculares**, están constituidos por sustancias polímeras, formadas por largas cadenas orgánicas, con pesos moleculares muy grandes (15.000 a 100.000) y tamaños entre 100 y 500 m $\mu$  de longitud por 0.2 y 1 m $\mu$  de grosor. Estos polímeros, como la gelatina, las proteínas, el almidón, etc. no obstante el estar dispersados molecularmente, no constituyen verdaderos solutos, sino coloides. El término coloide significa originalmente "gelatinoso" y fue dado por Graham a las dispersiones de proteínas, al comprobar que no se comportaban como verdaderas soluciones.

**Los coloides de asociación o micelares:** Pueden formarse por asociación de moléculas más pequeñas de minerales (ejemplo: oro) o compuestos orgánicos (ejemplo: jabones, detergentes), que espontáneamente se aglutinan en presencia de un dispersante en partículas de tamaño coloidal.

**Los coloides liofílicos:** (hidrofílicos cuando se refieren al agua) están constituidos por las dispersiones moleculares de sustancias poliméricas o sustancias aglutinadas en tamaño coloidal, que tienen una fuerte atracción por el solvente, y reaccionan químicamente con el agua, en la cual están dispersados (Ejemplo: jabones, materia orgánica encontrada en el agua negra). Su estabilidad depende de la capa de hidratación que los rodea en la cual hay moléculas de agua adheridas que actúan como barrera que impide el contacto entre partículas.

**Los coloides liofóbicos:** están, en cambio, formados por sustancias insolubles en el dispersante (ejemplo: arcillas, metales) y por lo mismo son mucho más inestables que los liofílicos. Son el tipo de dispersiones que más interesa en el tratamiento de aguas potables.

**Los coloides diuturnos:** (término propuesto por Mysels (1959) que significa de larga duración) son aquellos que no se modifican o se aglutinan durante mucho tiempo comparado con el periodo de observación.

**Los coloides caducos:** son al contrario, los transitorios que se aglutinan o cambian rápidamente.

Los coloides, además, pueden ser orgánicos como las proteínas o las grasas, o inorgánicos como el oro o las arcillas minerales.

### **3.2.6 PROPIEDADES DE LOS COLOIDES**

#### **3.2.6.1 PROPIEDADES CINÉTICAS**

##### **3.2.6.1.1 MOVIMIENTO BROWNIANO**

Una de las propiedades que más distingue a las dispersiones coloidales, es el que no pueden sedimentarse, aun cuando las partículas sean más densas que el líquido que las rodea.

Si una suspensión de dichas partículas es observada en un ultramicroscopio, se puede notar entre ellas un movimiento constante y desordenado. Este fenómeno fue estudiado por primera vez en una suspensión de granos de polen por el botánico inglés Brown, en 1828, de donde ha recibido el nombre de movimiento browniano. Weiner, en 1863, sugirió que el bombardeo de las *partículas hecho por las moléculas del líquido en el cual están dispersas*, es la causa del movimiento incesante de ellas. Experimentos posteriores han justificado esta conclusión.

##### **3.2.6.1.2 DIFUSIÓN**

El movimiento incesante de las partículas coloidales hace que éstas se difundan, esto es, que se distribuyan uniformemente en el solvente. La velocidad de difusión es mucho menor que la velocidad media de la partícula en el movimiento browniano. Por otra parte, cuanto más grande sea ésta la rata de difusión es menor.

##### **3.2.6.1.3 PRESIÓN OSMÓTICA**

Debido al movimiento browniano, si la concentración de partículas en un líquido no es uniforme, se produce un flujo de material desde las zonas de alta concentración hacia las de baja concentración hasta alcanzar un equilibrio. Esta es la razón por la cual si se introduce una celda, hecha de una membrana semipermeable que contenga cierta dispersión coloidal, en un líquido puro, éste trata de introducirse dentro de ella, para establecer una concentración uniforme diluyendo la dispersión coloidal y produciendo una elevación del líquido dentro de la celda. El incremento de volumen produce

una presión llamada, presión osmótica.

### **3.2.6.2 PROPIEDADES ÓPTICAS**

**Efecto Tyndall-Faraday** es un fenómeno por el cual las partículas coloidales provocan la dispersión de la luz cuando esta pasa a través de una suspensión coloidal. Esta dispersión es directamente proporcional al tamaño de las partículas.

La determinación nefelométrica de la turbiedad utiliza el efecto de Tyndall-Faraday para su medición. Cabe destacar, sin embargo, que por la naturaleza de la medición, la turbiedad no se relaciona con el número de partículas que la provocan, ni siquiera con la masa total.

Las propiedades ópticas son: la dispersión de la luz y la opalescencia.

#### **3.2.6.2.1 DISPERSIÓN DE LA LUZ**

Un rayo de luz es diseminado al pasar a través de una suspensión coloidal. La diseminación es proporcional al tamaño de las partículas. Cuando se usa un rayo bien definido se puede observar claramente un cono de luz. A este fenómeno se le suele llamar efecto de Tyndall-Faraday y se lo puede observar en la vida diaria cuando un rayo de luz penetra en una habitación oscura donde flotan partículas de polvo.

La diseminación hace aparecer las soluciones turbias. La turbiedad es por tanto una forma de medir la concentración de partículas coloidales en un líquido

#### **3.2.6.2.2 OPALESCENCIA**

Los coloides son primariamente incoloros. Sin embargo, las suspensiones coloidales aparecen con una cierta coloración. Por ejemplo, la suspensión de hidróxido férrico es roja. Esto puede deberse:

1. A la diseminación de la luz.
2. A la absorción selectiva por el coloide de una cierta longitud de onda.

La coloración puede usarse también para medir la concentración de los

coloides.

### 3.2.6.3 PROPIEDADES DE SUPERFICIE

Como se puede comprobar, las partículas coloidales se caracterizan por tener una gran superficie específica, definida como la relación entre el área superficial y la masa. Nótese el efecto de la disminución del tamaño de las esferas sobre el área total superficial y el tiempo de sedimentación requerido. La gran superficie específica da a los coloides una gran capacidad de adsorción y, por tanto, no resulta práctico sedimentar las partículas coloidales sin tratamiento químico previo.

Cuadro 2 Efecto al disminuir el tamaño de las esferas

Diámetro de la partícula (mm)	Escala de tamaños	Área superficial total	Tiempo requerido para sedimentar
10	Grava	3,15 cm <sup>2</sup>	0,3 s
1	Arena gruesa	31,50 cm <sup>2</sup>	3,0 s
0,1	Arena fina	315,00 cm <sup>2</sup>	38,0 s
0,01	Sedimento	3.150,00 cm <sup>2</sup>	33,0 min
0,001	Bacteria	3,15 m <sup>2</sup>	55,0 horas
0,0001	Partícula coloidal	31,50 m <sup>2</sup>	230,0 días
0,00001	Partícula coloidal	0,283 ha	6,3 años
0,000001	Partícula coloidal	2,83 ha	63,0 años

Área superficial Total: Área de partículas del tamaño indicado, producida a partir de una partícula de 100mm de diámetro y gravedad específica de 2,65.

Tiempo requerido para sedimentar: Cálculos basados en esferas con gravedad específica de 2,65 que sedimentan 30 cm.

### 3.2.6.4 PROPIEDADES ELECTROKINÉTICAS

La electroforesis es un fenómeno que permite demostrar que las partículas coloidales tienen carga eléctrica. Consiste en hacer pasar una corriente directa a través de una solución coloidal, experimento que permite observar

que las partículas son atraídas por el electrodo positivo o por el negativo, lo que demuestra que poseen carga eléctrica. Este fenómeno es muy importante porque permite comprender la estabilidad de las dispersiones coloidales. Por lo general, los coloides presentan carga negativa; es decir, en la electroforesis son atraídos por el electrodo positivo.

Una celda de electroforesis permite calcular el potencial zeta de un sistema coloidal, que es una función de la densidad de las cargas absorbidas, y se mide en milivoltios. Frecuentemente, el potencial zeta se encuentra entre 30 y 40 milivoltios, cuando un coloide es estable. Cuando cae a menos de 15 ó 20 milivoltios, es posible la coagulación y el coloide tiende a sedimentar.

### **3.2.7 ESTABILIDAD E INESTABILIDAD DE LOS COLOIDES**

#### **3.2.7.1 ESTABILIDAD**

Es la propiedad inherente de las partículas coloidales a permanecer en dispersión en el transcurso del tiempo.

Entre las fuerzas de estabilización o repulsión podemos mencionar las siguientes:

- a) La carga de las partículas.
- b) La hidratación, que generalmente es importante para los coloides hidrofílicos, aunque tienen menor importancia en este caso.

La estabilidad de los coloides hidrofóbicos se debe en gran parte a su carga. Como se sabe, estas partículas suspendidas en el agua tienen cargas eléctricas en sus respectivas superficies, en el caso de las partículas que se encuentran en las aguas naturales, esta carga primaria suele ser negativa. Así mismo, no es posible considerar a las partículas como porciones discretas de materia suspendida o desplazándose en un líquido, sino más bien como cantidades constituidas por varios componentes, además de la partícula primaria. Así se tiene una doble capa existente entre el sólido y el

agua, esta doble capa está formada por una capa adherida y otra difusa.

La capa adherida, es producto de la carga negativa que tiene el coloide, es decir que en la superficie de ésta llegan tantos iones de signo contrario (contraiones), los cuales han estado sujeto a la influencia de la atracción electrostática dando como resultado la adherencia en la superficie del coloide.

La segunda capa o capa difusa, es formada por la agitación térmica del agua la cual ocasiona los contraiones se separen de la superficie del coloide y queden suspendidos en la solución.

En consecuencia de la doble capa que rodea cada partícula es la de crear regiones de potencial eléctrico en una solución que, teóricamente, tiene el potencial cero. Existen tres potenciales que presentan un coloide:

El potencial  $q$  ( $q$ ) en la cual se presenta la superficie coloidal. Es un potencial eléctrico creado por la presencia del coloide en el agua, que disminuye con la distancia, a partir de la superficie del mismo, donde es máximo. Se le denomina potencial de Nernst.

El potencial  $\Phi$  ( $\phi$ ), se presenta en el interior de la superficie de la doble capa, donde comienza la capa difusa.

El potencial Zeta ( $\zeta$ ) es el potencial reinante en el límite de la capa de adsorción y la capa difusa (plano de cizalla), no es más que una fracción del potencial total. Además es el más importante de la coagulación.

El efecto neto de la doble capa alrededor de las partículas es el de impedir una estrecha aproximación de unas a otras y, en consecuencia estas dobles capas le comunican estabilidad a la suspensión.

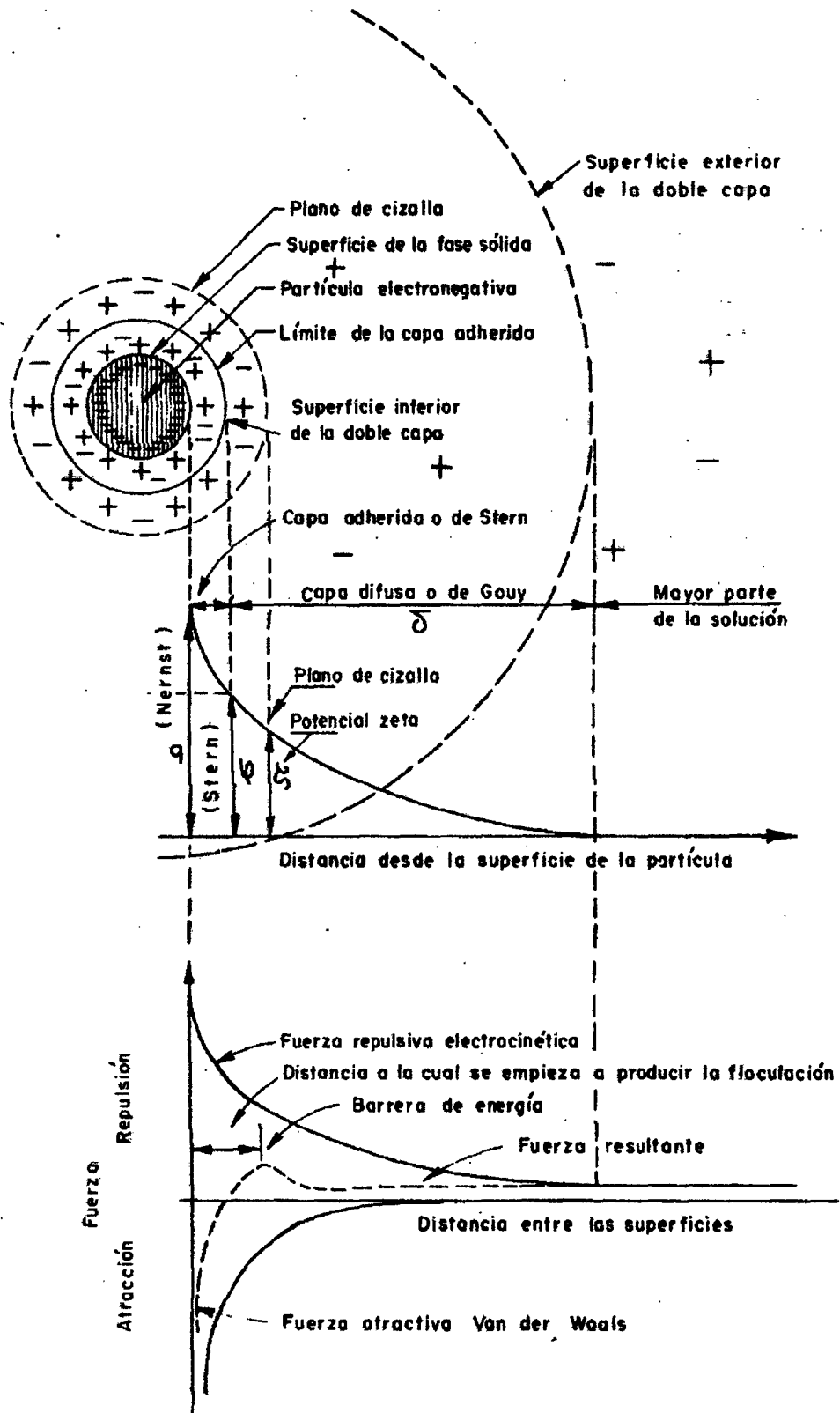


Figura 3.2 El coloide y su doble capa eléctrica

### 3.2.7.2 INESTABILIDAD

Expresa la tendencia de dichas partículas a coagularse, siempre que entre en contacto entre sí.

Los factores de atracción o desestabilización son los siguientes:

a) La gravedad. Es insignificante en la desestabilización de las partículas coloidales y, por lo tanto, no se tratará con mayor detalle.

b) El movimiento browniano. Permite que las partículas entren en contacto, lo que constituye un requerimiento para la desestabilización.

c) La fuerza de Van der Waals. Una fuerza débil de origen eléctrico, es un factor muy importante, pues constituye la principal fuerza atractiva entre las partículas coloidales. Estas fuerzas siempre atractivas, que decrecen rápidamente con la distancia, se deben a la interacción de dipolos permanentes o inducidos en las partículas.

## 3.3 MECANISMOS DE DESESTABILIZACIÓN DE LOS COLOIDES

Existen dos teorías generales que explican los mecanismos involucrados en la desestabilización, ambas teorías no se excluyen mutuamente, sino más bien es preciso invocar ambas para explicar el proceso de coagulación.

### 3.3.1 TEORÍA FÍSICA

Basado en la teoría de la comprensión de la doble capa

#### 3.3.1.1 COMPRENSIÓN DE LA DOBLE CAPA

Este modelo físico de doble capa puede explicar el fenómeno de la desestabilización de un coloide por un coagulante. La curva de atracción de Van der Waals es fija mientras que la de repulsión eléctrica disminuye si se



incrementan en la solución los iones de carga opuesta. En consecuencia, si se reduce el potencial repulsivo, decrece también la curva resultante de interacción. Por lo tanto, las partículas pueden acercarse suficientemente para ser desestabilizadas por la energía atractiva de Van der Waals.

La introducción de un electrolito indiferente en un sistema coloidal causa un incremento de la densidad de cargas en la capa difusa y disminución de la "esfera" de influencia de las partículas, y ocurre la coagulación por compresión de la capa difusa. Concentraciones elevadas de iones positivos y negativos (fuerza iónica grande) en el agua acarrearán un incremento del número de iones en la capa difusa que, para mantenerse eléctricamente neutra, necesariamente tiende a reducir su volumen, de modo tal que las fuerzas de Van der Waals sean dominantes, y se elimine la estabilización electrostática. Un ejemplo típico de este mecanismo ocurre cuando aguas dulces con fuerza iónica pequeña se mezclan con agua de mar, lo que promueve la formación de depósitos en las desembocaduras.

Cuando se aumenta en la solución iones de carga opuesta, la curva de repulsión eléctrica disminuye mientras que la de Van Der Waals, se mantiene siempre fija. Al disminuir el potencial repulsivo disminuye el espesor de la capa difusa, así como también la curva resultante de interacción, por lo tanto las partículas pueden acercarse suficientemente para ser desestabilizadas por la energía atractiva de Van Der Waals.

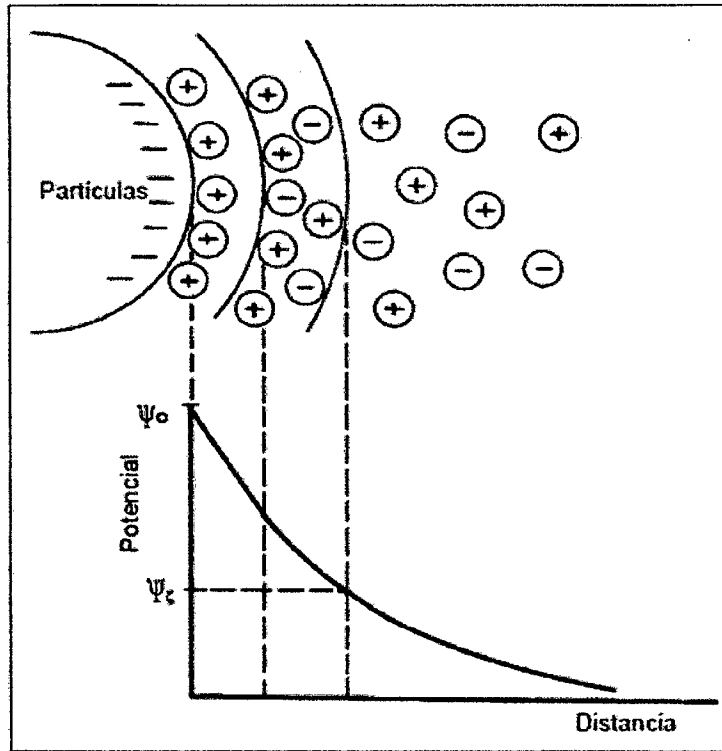


Figura 3.3 Variación del espesor de la capa difusa en relación a la alta concentración de iones

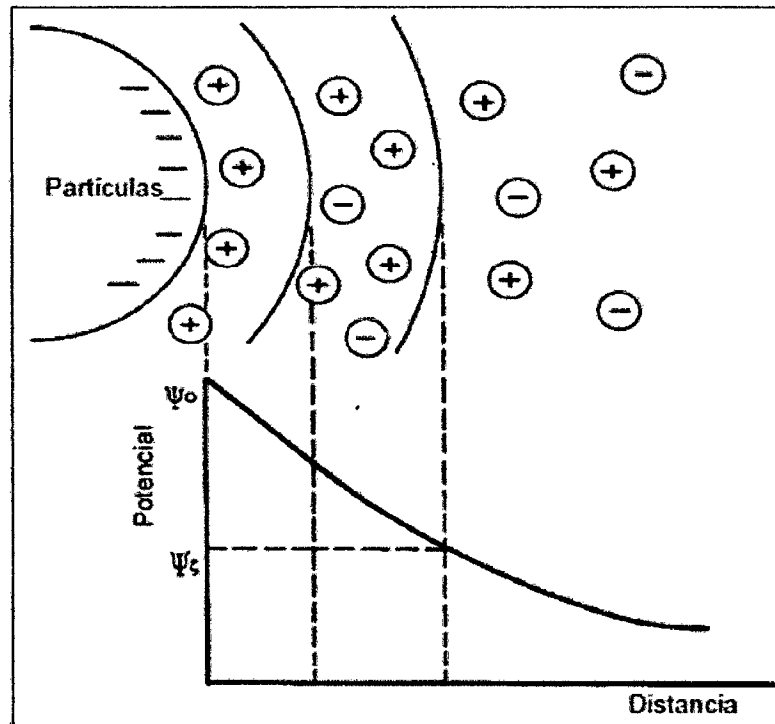


Figura 3.4 Variación del espesor de la capa difusa en relación a la baja concentración de iones

Los coloides se aproximan a distancia menor que la energía, cuando el potencial zeta baja hasta un punto llamado "punto isoeléctrico" ( $\zeta=0$ ), lo que sucede si:

- Se neutraliza la carga "q"
- Se represa  $\delta$  incrementando el número de iones en la solución.

a. Coagulación por neutralización de la carga: La neutralización de las cargas de coloides liofóbicos, puede hacerse:

Por cambio de la concentración de los iones que determinan el potencial del coloide

Por la adsorción de iones que posean una carga opuesta a las iones determinantes del potencial, y que sean capaces de reemplazar a estos de la capa Stern.

Este tipo de coagulación se realiza mediante el mecanismo de interacción de la superficie específica.

b. Coagulación por comprensión de la doble capa: Incrementando la concentración del electrolito se incorporan contrapones en la capa difusa, con lo cual esta se represa y se disminuye la magnitud de las fuerzas repulsivas, permitiendo la eliminación de la barrera de energía. Por eso la adición de una sal neutra (electrolito indiferente) no cambia el potencial del coloide pero altera la forma de la curva de las fuerzas coulombicas, disminuyendo la distancia  $\delta$  hasta la cual son efectivas.

Del modelo físico, se deducen los siguientes principios:

- Existe una concentración crítica de coagulación que debiera alcanzar cuando los coloides disminuyen su potencial hasta alcanzar el punto isoeléctrico ( $\zeta = 0$ )

- La concentración crítica de coagulación debe ser independiente de la fase dispersa o concentración de sólidos floculables en el agua.
- El exceso de coagulantes agregados en el agua, no puede producir mayor inestabilidad de las partículas, por lo tanto los coloides no adsorben mas contraiones que su carga primaria se lo permite.

Los principios mencionados anteriormente no se cumplen siempre, por lo que el modelo físico no puede explicar la totalidad del fenómeno. Por lo que se ha recurrido a un modelo químico para complementarlo.

### **3.3.2 TEORÍA QUÍMICA**

Debido a que la desestabilización de los coloides producida por los compuestos poliméricos con carga negativa no puede ser explicada por el modelo físico, surge entonces ésta teoría, basada en los puentes químicos, lo cual fue presentada por La Mer, quien sostiene que la molécula del polímero se adhiere a la superficie del coloide en uno o más sitios de adsorción, dejado libre, extendida en el agua el resto de la cadena, la cual puede pegarse de nuevo a otros coloides en sitios de adsorción vacantes. Se forma así un puente químico entre las partículas, que permite el incremento del tamaño de éstas y promueve su precipitación.

El modelo del puente químico, también explica la relación que existe en la cantidad de superficie disponible o cantidad de coloides y la cantidad de coagulantes agregados. Además se puede comprender el hecho de que en muchos casos se obtenga una coagulación óptima con polímeros que tienen una carga similar a los de los coloides.

Descripción de la teoría de La Mer:

Reacción 1. Un polímero tiene ciertos grupos que interaccionan con la superficie de las partículas coloidales y se deja que el resto de la molécula se extienda hacia la solución.

Reacción 2. Si una segunda partícula con algunos sitios de adsorción vacíos entra en contacto con los segmentos extendidos, puede realizarse una unión. El polímero sirve de puente en el complejo partícula-polímero-partícula.

Reacción 3. Si no se dispone de una segunda partícula, los segmentos dispersos del polímero pueden eventualmente adsorberse en otros lados de la partícula original, lo que hace imposible que el polímero sirva de puente y se produce la reestabilización de las partículas.

Reacción 4. El modelo de puente puede explicar cualitativamente la reestabilización como resultado de la saturación de las superficies coloidales por el polímero, sin dejar lugar para la formación de puentes interparticulares.

Reacciones 5 y 6. En algunos casos, los sistemas coloidales desestabilizados pueden ser reestabilizados por medio de agitación intensa, debido a que se rompen las uniones polímero-superficie, y ocurre una adsorción secundaria de los fragmentos de los flóculos.

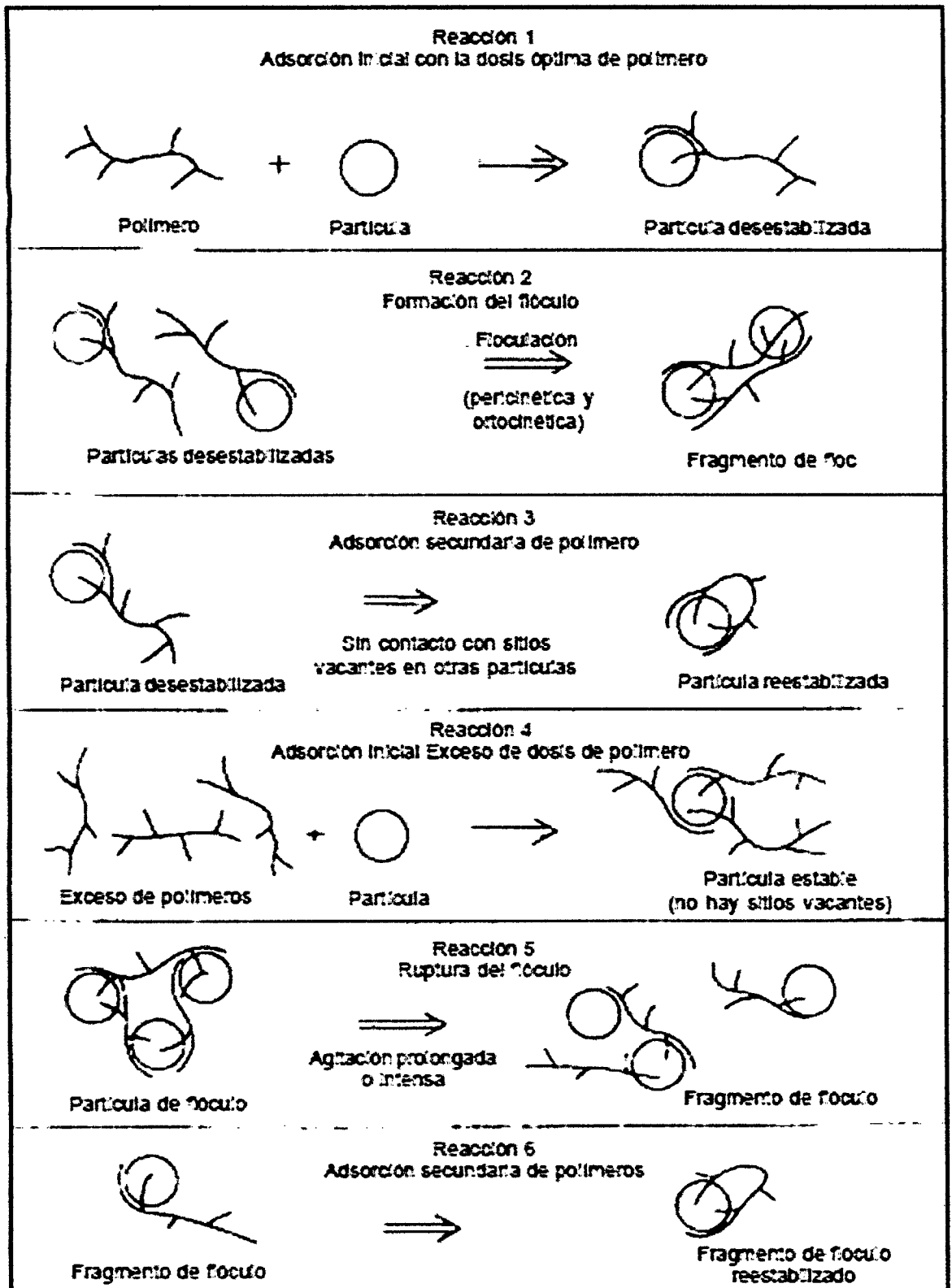


Figura 3.5 Representación esquemática para el modelo de puentes en la desestabilización de coloides mediante polímeros

### **3.4 CINÉTICA O ETAPAS DE LA COAGULACIÓN**

Considerando la discusión teórica que antecede, Stumm y O'Melia identificaron varias etapas en el proceso de coagulación.

- 1) Hidrólisis de los iones metálicos multivalentes y su consecuente polimerización hasta llegar a especies hidrolíticas multinucleadas.
- 2) Adsorción de las especies hidrolíticas en la interfaz de la solución sólida para lograr la desestabilización del coloide.
- 3) Aglomeración de las partículas desestabilizadas mediante un puente entre las partículas que involucra el transporte de estas y las interacciones químicas.
- 4) Aglomeración de las partículas desestabilizadas mediante el transporte de las mismas y las fuerzas de Van der Waals.
- 5) Formación de los flóculos.
- 6) Precipitación del hidróxido metálico.

Algunas de estas etapas ocurren secuencialmente. Otras coinciden parcialmente y otras incluso pueden ocurrir simultáneamente. Se puede suponer que las diferentes etapas de la reacción pueden resultar controlables en un cierto porcentaje, bajo diversas condiciones químicas (figura 3.6).

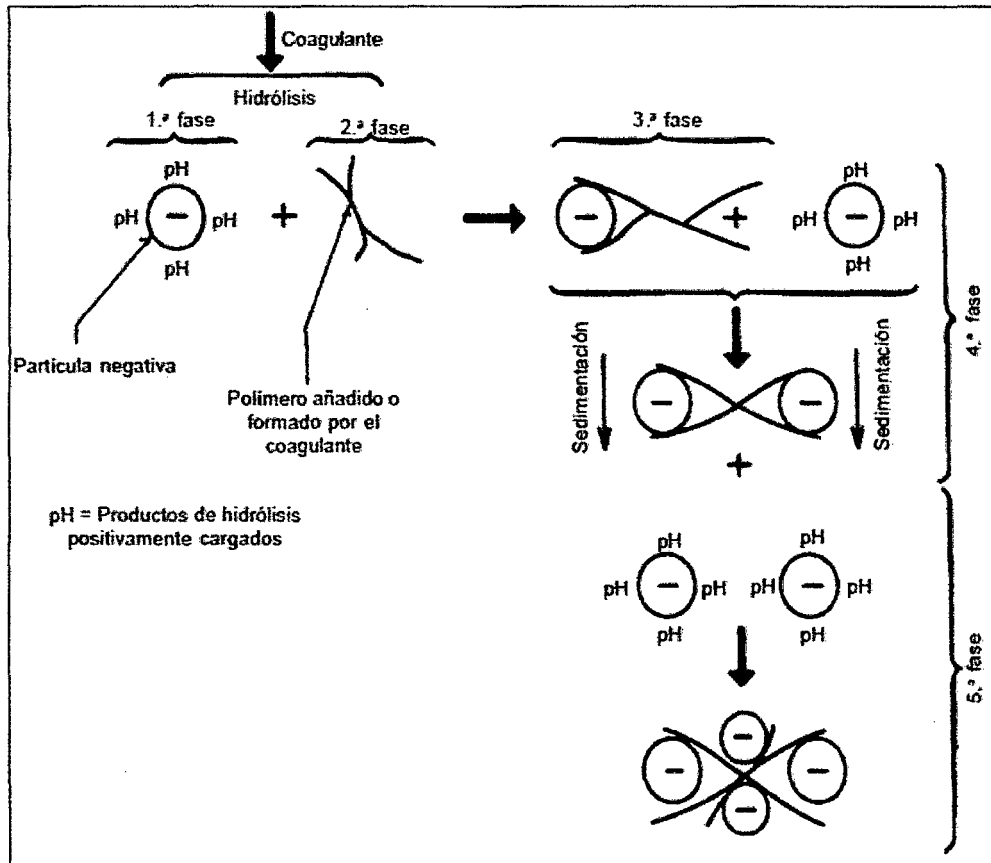


Figura 3.6 Modelo esquemático del proceso de coagulación

### 3.5 TIPOS DE COAGULACIÓN

#### 3.5.1 COAGULACIÓN POR ADSORCIÓN

Este mecanismo es denominado neutralización de carga (también se le llama de desestabilización-adsorción).

Este tipo de coagulación se presenta cuando existe en el agua una alta concentración de partículas en estado coloidal. Debido a la abundancia de los coloides, la distancia entre ellos es pequeña siendo por lo tanto la mayor fuerza de atracción y la energía requerida para su desestabilización, así como el potencial zeta resultante.



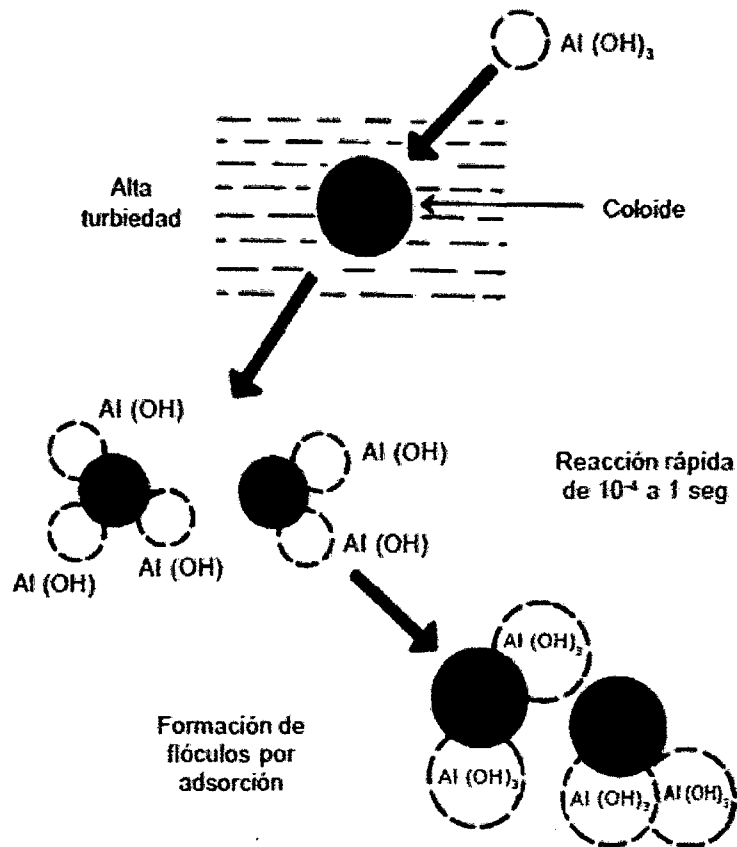


Figura 3.7 Coagulación por adsorción

### 3.5.2 COAGULACIÓN POR BARRIDO

Este tipo de coagulación se presenta cuando el agua es clara. Debido a la poca cantidad de partículas coloidales, la distancia entre ellas es grande, por lo que se requiere una mayor cantidad de coagulante y energía para desestabilizarlos, aumentando el potencial zeta. Además cabe indicar que el tiempo de reacción requerido en este tipo de coagulación es mayor que el que se requiere en la coagulación por adsorción.

La coagulación por barrido se produce cuando se agrega una concentración de coagulantes tan alta que se excede el límite de solubilidad de ese compuesto en el agua. En ese momento se precipitan los hidróxidos que se forman por reacción de la alcalinidad y el agua misma con los coagulantes,

con lo que se induce la producción de una masa esponjosa (flóculo de barrido) que atrapa en su caída a los coloides y partículas suspendidas las cuales se ven forzadas a decantar incorporadas dentro del precipitado que desciende.

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

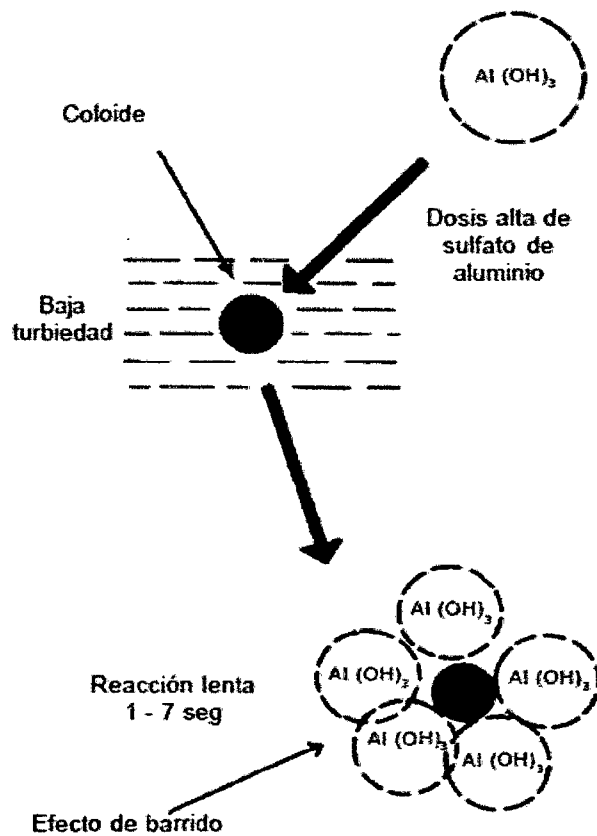


Figura 3.8 Coagulación de barrido o arrastre de partículas

### **3.6 FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA COAGULACIÓN**

#### **3.6.1 LA CALIDAD DEL AGUA CRUDA**

Las características del agua cruda que más influyen en la eficiencia del proceso son la concentración de coloides (medida normalmente mediante la cantidad de turbiedad o color presente en el agua), la alcalinidad y el pH, el tamaño de las partículas y la temperatura.

##### **3.6.1.1 CONCENTRACIONES DE COLOIDES, ALCALINIDAD Y PH**

Se presentan cuatro situaciones diferentes, dependiendo de las variaciones de coloides en el agua.

a) **Alta concentración de coloides y alcalinidad baja**

Es el sistema más fácil de tratar, ya que solo se debe determinar un parámetro químico: la dosis óptima de coagulante. La desestabilización se realiza por medio de la adsorción de especies hidrolíticas con carga positiva, que se producen instantáneamente con niveles de pH ácidos (pH 4 a 6, dependiendo del coagulante).

b) **Alta concentración de coloides y alcalinidad alta**

En este caso, la desestabilización se realiza nuevamente por medio de adsorción y neutralización de la carga con niveles de pH neutros o ácidos. La neutralización de la carga es más fácil, debido a que el pH permanece generalmente en la región neutral, donde los polímeros de hidróxidos metálicos no tienen carga muy alta.

c) **Baja concentración de coloides y alcalinidad alta**

La coagulación se realiza en este caso con una dosis de coagulantes relativamente alta para capturar las partículas coloidales. Como alternativa, se puede agregar arcilla o bentonita, para aumentar la concentración coloidal y el contacto interparticular. La desestabilización se realizaría, en este caso, mediante la adsorción y la neutralización de la carga.

d) **Baja concentración coloidal y alcalinidad baja**

En estos sistemas la coagulación es más difícil. La coagulación por medio de captura se dificulta, ya que el pH disminuye al agregar el coagulante y no permite la formación de hidróxidos. Asimismo, la coagulación por medio de adsorción también es difícil, ya que la concentración coloidal es demasiado baja para permitir el contacto interparticular. Para realizar una coagulación efectiva, deberá agregarse alcalinidad adicional y/o bentonita o preferentemente arcilla.

### **3.6.2 EFECTO DE PH**

El pH es una variable independiente más importante. Existe una escala de pH para un agua dada, la amplitud de esta escala está influenciada por el tipo de coagulante empleado, así como también por la composición química del agua y concentración del coagulante.

### **3.6.3 EFECTO DE LAS SALES**

Las aguas naturales nunca son puras, sino que constituyen soluciones diluidas de sales inorgánicas de concentraciones y composiciones diversas. El efecto de estas sales es función del ion específico y de su concentración, las principales consecuencias de la presencia de algunos iones son la modificación de los siguientes factores:

El margen de pH de coagulación óptima.

El tiempo necesario para la floculación.

La dosis óptima del coagulante.

El coagulante residual en el efluente.

### **3.6.4 EFECTO DE LA NATURALEZA DE LA TURBIEDAD**

La coagulación también depende de la naturaleza de la turbiedad. Para cualquier concentración de turbiedad arcillosa es preciso añadir una cierta cantidad mínima de coagulante, a medida que aumenta la turbiedad es necesario adicionar algo más de coagulante, pero la dosis de ésta no aumenta linealmente con el aumento de turbiedad. Paradójicamente, en el caso de turbiedades muy elevadas se requiere dosis de coagulante

relativamente más pequeña, debido a las mayores probabilidades de colisión; por esta misma razón, en las turbiedades muy bajas suelen ser más difíciles de eliminar por coagulación.

Así mismo las aguas que contienen coloides orgánicos derivados de la polución provocadas por las aguas urbanas e industriales residuales suelen ser más difíciles de coagular, y debido a las muchas reacciones químicas que tiene lugar entre el coagulante y la materia orgánica coloidal, la dosis del coagulante deben ser mucho mayor.

### **3.6.5 EFECTO DEL COAGULANTE**

El tipo de coagulante es también uno de los factores que influye en el proceso de coagulación, así las sales de hierro son más ventajosas que el alumbre cuando se tiene agua coloreada, ya que las sales de hierro con respecto al aluminio tienen un margen de pH más amplio.

La selección de coagulante a utilizar debe basarse en la eficiencia de éste en comparación con otros, sin olvidar la eficiencia de los factores económicos.

### **3.6.6 EFECTO DE LA TEMPERATURA**

Este efecto se presenta en zonas de climas muy marcados donde se alcanza temperaturas de congelación. A medida que la temperatura de agua se acerca a los 0 °C, la remoción de la turbiedad se dificulta.

Lo que sí se sabe que al disminuir la temperatura, aumenta la viscosidad del agua y, en consecuencia, la velocidad de sedimentación del flóculo disminuye. Así mismo se tiene conocimiento que la disminución de la temperatura reduce la velocidad de las reacciones químicas, en lo que respecta a la coagulación, pero este defecto es demasiado pequeño para ser significativo. También se ha observado que el valor óptimo del pH disminuye en función del descenso de la temperatura.

En el rango de 10-40 °C se encontró que la eficiencia era cada vez mejor al aumentar la temperatura porque se incrementaba la tasa de colisiones entre las partículas. Dentro de este rango, son importantes la turbiedad y la alcalinidad.

## CAPITULO 4. FLOCULACIÓN

### 4.1 DEFINICIÓN

La floculación es el proceso mediante el cual partículas coloidales ya desestabilizadas tienden a trasladarse dentro del líquido, para entrar en contacto una con otras, y aglutinarse promoviendo el crecimiento del microfloculo, hasta alcanzar el tamaño y el peso necesario para que sedimenten con mayor eficiencia para su posterior remoción.

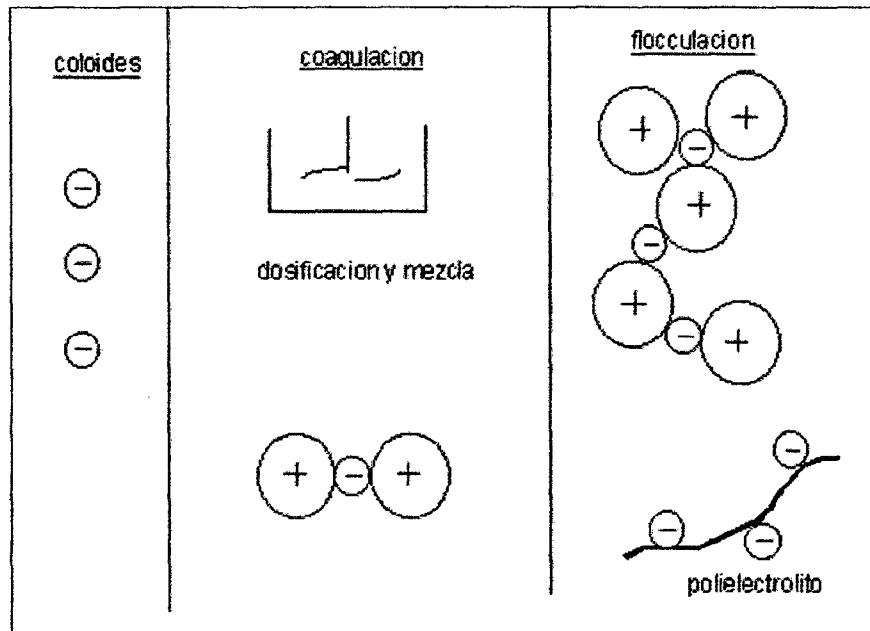


Figura 4.1 Proceso de floculación

## **4.2 MECÁNICA DE FLOCULACIÓN**

La floculación puede presentarse mediante dos mecanismos: floculación ortocinética y pericinética, según sea el tamaño de las partículas desestabilizadas (en general todas las partículas se ven afectadas por ambos mecanismos). Las partículas pequeñas ( $<1\mu$ ) están sometidas a floculación pericinética, motivada por el movimiento browniano, mientras que las que presentan un tamaño mayor ( $>1\mu$ ), están afectadas principalmente por el gradiente de velocidad del líquido, predominando en ella la floculación ortocinética.

### **4.2.1 FLOCULACIÓN PERICINÉTICA O BROWNIANA**

La floculación pericinética se realiza mediante la unión de partículas pequeñas, motivada por efecto térmico lo que se traduce en movimiento browniano, que provoca la difusión uniforme de partículas en la solución.

Al dispersarse el coagulante en la masa de agua y desestabilizarse las partículas, se precisa de la floculación pericinética para que las partículas coloidales de tamaño menor de un micrómetro empiecen a aglutinarse. El movimiento browniano actúa dentro de este rango de tamaño de partículas y forma el microflóculo inicial.

### **4.2.2 FLOCULACIÓN ORTOCINÉTICA O GRADIENTE DE VELOCIDAD**

Recién cuando el flóculo alcanza el tamaño de un micrómetro empieza a actuar la floculación ortocinética, promoviendo un desarrollo mayor del microflóculo. Este mecanismo ha sido estudiado en lugares donde la temperatura baja alrededor de cero grados, rango dentro del cual el movimiento browniano se anula y, por consiguiente, también lo hace la floculación pericinética.

### **4.2.3 SEDIMENTACIÓN DIFERENCIAL**

Se debe a las partículas grandes, que, al precipitarse, colisionan con las más pequeñas, que van descendiendo lentamente, y ambas se aglomeran.

## **4.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FLOCULACIÓN**

### **4.3.1 NATURALEZA DEL AGUA**

Las partículas que producen la turbiedad también tienen una notable influencia debido a la concentración y su naturaleza, en este proceso la velocidad de formación de los flóculos es proporcional tanto a la concentración de las partículas como al tamaño inicial de éstas. Es más fácil flocular aguas con elevada turbiedad y que presentan una amplia distribución del tamaño de partículas por el contrario flocular aguas de mínima turbiedad complican el proceso de floculación. Asimismo algunos iones presentes en el agua pueden influir en el equilibrio fisicoquímico del sistema, afectando el tiempo de este.

### **4.3.2 TIEMPO DE FLOCULACIÓN**

El tiempo de formación de flóculo es proporcional a la velocidad de aglomeración de las partículas, por lo que este proceso deberá realizarse en un tiempo suficiente, como para que la formación de flóculo sea adecuada. Tiempos menores o mayores al óptimo, reducen la eficiencia del proceso.

Bajo determinadas condiciones, existe un tiempo óptimo para la floculación, normalmente entre 20 y 40 minutos.

La permanencia del agua en el floculador durante un tiempo inferior o superior al óptimo produce resultados inferiores, tanto más acentuados cuanto más se aleje este del tiempo óptimo de floculación.

### **4.3.3 GRADIENTE DE VELOCIDAD**

Es de importancia tener presente la gradiente que se va aplicar a una masa de agua. Cuanto mayor es el gradiente de velocidad, más rápida es la velocidad de aglomeración de las partículas. Mientras tanto, a medida que los flóculos aumentan de tamaño, crecen también las fuerzas de cizallamiento, inducidas por el gradiente de velocidad. Los flóculos crecerán hasta un tamaño máximo, por encima del cual las fuerzas de cizallamiento alcanzan una intensidad que los rompe en partículas menores.



La resistencia de los flóculos depende de una serie de factores:

- De su tamaño, forma y compactación;
- Del tamaño, forma y naturaleza de las micropartículas; y
- Del número y forma de los ligamentos que unen a las partículas.

#### 4.3.4 PARÁMETROS OPERACIONALES

El producto de gradiente de velocidad ( $G$ ) y el tiempo de retención ( $T$ ) viene a hacer lo que denominamos, número de campo ( $N_c$ ) estos son los parámetros operacionales principales en los procesos de floculación. Este valor deberá ser seleccionado cuidadosamente para no causar la disolución o desintegración de los flóculos después de que estos se hayan formado.

A través de investigaciones se ha determinado que el tiempo de retención oscila entre 10 y 30 minutos mientras que el rango óptimo de gradientes de velocidad para la floculación varía entre 20 y 75  $s^{-1}$ . Naturalmente, conviene realizar una división en compartimientos con gradientes escalonados en forma decreciente. A gradientes lentos la formación de flóculo es lenta.

Los gradientes de velocidad en los canales, compuertas o cualquier otra estructura de paso del agua floculada no deben ser mayores de 20  $s^{-1}$ .

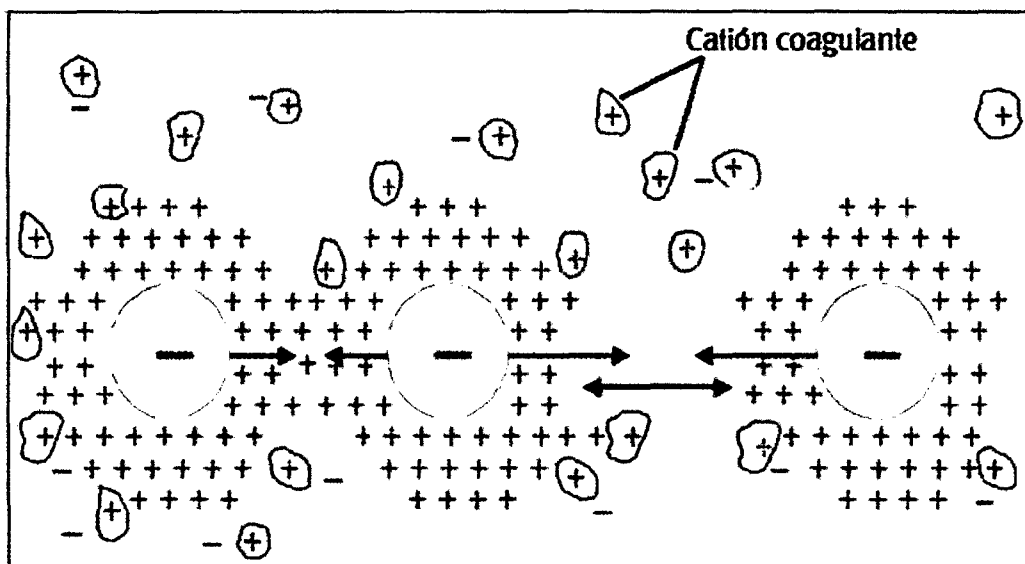


Figura 4.2 Detalle de cargas negativas realizando coagulación.

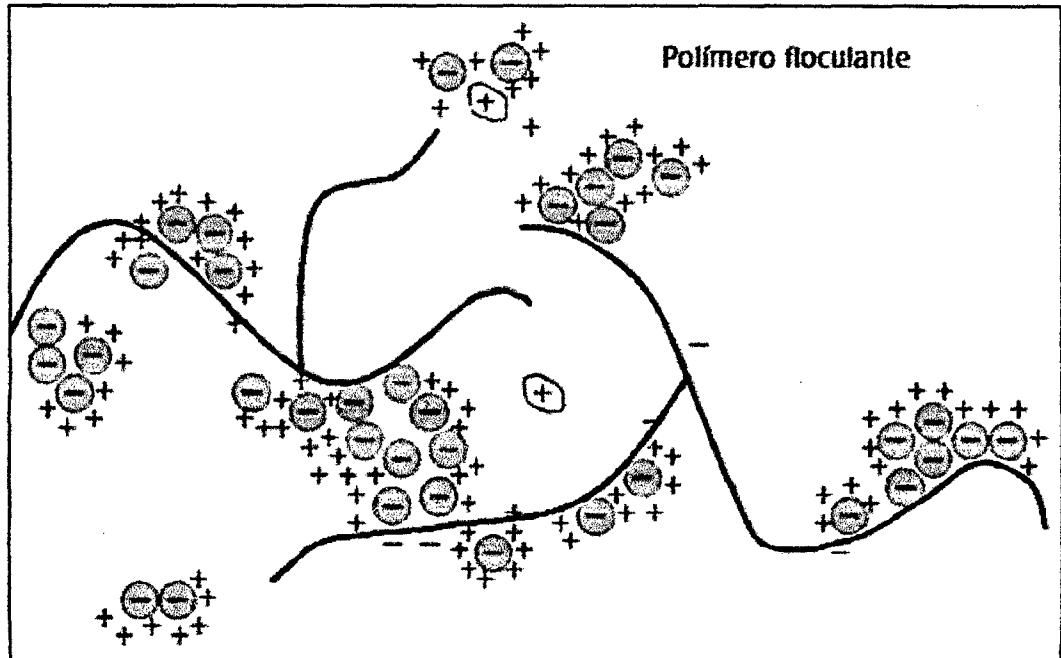


Figura 4.3 Ilustración con detalle de cargas de los flóculos formados.

#### 4.4 TIEMPO INICIAL DE FORMACIÓN DE FLÓCULO

Determinar, en segundos, el tiempo que tarda en aparecer el primer indicio de formación de flóculo es uno de los sistemas para cuantificar la velocidad de la reacción. La iluminación de la base del agitador ayuda en esta determinación, que ni aún así suele ser fácil, pues cuando el flóculo recién se forma, es casi incoloro. Por otra parte, el flóculo que se forma más rápido no necesariamente es el mejor.

#### 4.5 TAMAÑO DEL FLÓCULO PRODUCIDO

Se observa el tamaño del flóculo producido y se lo evalúa cualitativamente según sus características. Su tamaño puede expresarse en mm de acuerdo con el comparador desarrollado por el Water Research Institute de Inglaterra o según el índice de Willcomb, que se incluye en el siguiente cuadro y figura. Se escoge como dosis óptima la de la jarra que produce una partícula más grande, aunque no siempre el mayor tamaño de partículas produce la mayor velocidad de asentamiento aparente y que deje ver el agua más cristalina

entre los flóculos.

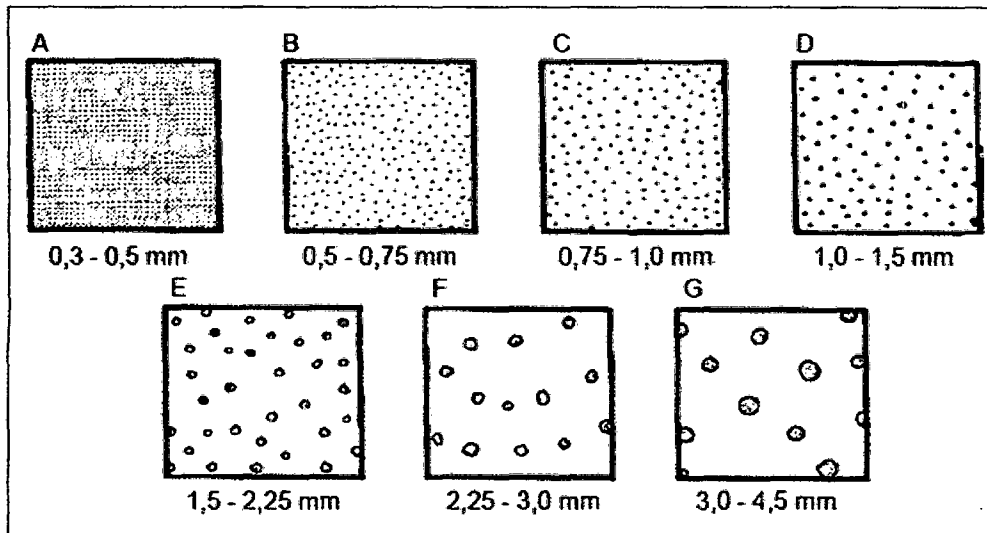


Figura 4.4 Comparador para estimar el tamaño del flóculo producido en la coagulación (según WRA)

Cuadro 3 Cuadro Índice de floculación de Willcomb

Número del índice	Descripción
0	Flóculo coloidal. Ningún signo de aglutinación.
2	Visible. Flóculo muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado.
4	Disperso. Flóculo bien formado pero uniformemente distribuido. (Sedimenta muy lentamente o no sedimenta)
6	Claro. Flóculo de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.
8	Bueno. Flóculo que se deposita fácil pero no completamente.
10	Excelente. Flóculo que se deposita completamente, dejando el agua cristalina.

## **CAPITULO 5. SEDIMENTACIÓN**

### **5.1 DEFINICIÓN**

La sedimentación es la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua. Estas partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido.

La remoción de partículas en suspensión en el agua puede conseguirse por sedimentación o filtración. De allí que ambos procesos se consideren como complementarios.

La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. A menudo se utilizan para designar la sedimentación los términos de clarificación y espesamiento. Se habla de clarificación cuando hay un especial interés en el fluido clarificado, y de espesamiento cuando el interés está puesto en la suspensión concentrada.

Las partículas en suspensión sedimentan en diferente forma, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración. Es así que podemos referirnos a la sedimentación de partículas discretas, sedimentación de partículas floculentas y sedimentación de partículas por caída libre e interferida.

### **5.2 SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS DISCRETAS.**

Se llama partículas discretas a aquellas partículas que no cambian de características (forma, tamaño, densidad) durante la caída. Se denomina

sedimentación o sedimentación simple al proceso de depósito de partículas discretas.

Este tipo de partículas y esta forma de sedimentación se presentan en los desarenadores, en los sedimentadores y en los presedimentadores como paso previo a la coagulación en las plantas de filtración rápida y también en sedimentadores como paso previo a la filtración lenta.

### **5.3 SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS FLOCULENTAS.**

Se denomina sedimentación floculenta o decantación al proceso de depósito de partículas floculentas. Este tipo de sedimentación se presenta en la clarificación de aguas, como proceso intermedio entre la coagulación floculación y la filtración rápida.

Partículas floculentas son aquellas producidas por la aglomeración de partículas coloides desestabilizadas a consecuencia de la aplicación de agentes químicos. A diferencia de las partículas discretas, las características de este tipo de partículas de forma, tamaño y densidad sí cambian durante la caída.

### **5.4 SEDIMENTACIÓN POR CAIDA LIBRE O INTERFERIDA.**

Cuando existe una baja concentración de partículas en el agua, éstas se depositan sin interferir. Se denomina a este fenómeno caída libre. En cambio, cuando hay altas concentraciones de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija y ocurre un depósito másivo en lugar de individual. A este proceso de sedimentación se le denomina depósito o caída interferida o sedimentación zonal.

Cuando las partículas ya en contacto forman una masa compacta que inhibe una mayor consolidación, se produce una compresión o zona de compresión. Este tipo de sedimentación se presenta en los concentradores de lodos de las unidades de decantación con manto de lodos.

## **5.5 EXPRESIONES DE VELOCIDADES.**

### **5.5.1 SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS FLOCULENTAS.**

Las partículas que se remueven en una planta de tratamiento de agua son sólidos inorgánicos y orgánicos. Los factores primordiales que influyen en la velocidad de sedimentación son su tamaño, forma y densidad.

La materia en suspensión que origina la turbiedad consiste principalmente en sílice finamente dividida, arcilla y limo. La densidad original de las partículas es cercana a 2,60. El color, en cambio, es producido principalmente por ácidos orgánicos (fúlvicos, húmicos, etc.) de origen vegetal con densidades variables de 1 a 1,5 dependiendo de su concentración. Las partículas se presentan principalmente en estado coloidal y es necesario añadirles coagulantes químicos y someterlas a procesos de coagulación y floculación para incrementar su tamaño o densidad antes del proceso de sedimentación.

Las partículas en suspensión de aguas tratadas con coagulantes, consisten en flóculos formados por óxidos metálicos ( $Al_2O_3$  o  $Fe_2O_3$ ), agua en 85 a 95% y turbiedad y/o color con densidades variables entre 1,002 cuando predomina el color y 1.03 cuando predomina la turbiedad. En procesos de ablandamiento los flóculos tienen densidades cercanas a 1.20.

El diámetro de los flóculos es variable desde menos de 0,001 mm hasta más de 5 mm, dependiendo de las condiciones de mezcla y floculación (gradientes de velocidad y tiempo de retención). Willcomb clasifica los flóculos por su tamaño tal como se indica en la figura 4.4.

La velocidad de sedimentación de las características de las suspensiones, así como de las características hidráulicas de los sedimentadores y de la presentación de procesos concomitantes: floculación por diferencia de velocidades de los flóculos, influencia de turbulencia y variación de gradientes de velocidad, factores que imposibilitan la preparación de un modelo matemático general. Por este motivo se recurre a ensayos en laboratorio o plantas piloto con el propósito de predecir la eficiencia, cargas superficiales o velocidades de sedimentación preseleccionadas. En ellos se deben tomar las siguientes precauciones:

Que la muestra de la suspensión sea representativa y que se mantenga a igual temperatura.

Sedimentación de partículas floculentas con caída libre. Si en una suspensión tenemos una concentración  $(1-C)$  de partículas que tienen una velocidad de sedimentación  $V_s$  la proporción adicional de partículas removidas que tiene una velocidad de sedimentación  $V_s$  será:

$$R = \frac{1}{V_s} \int_0^C V dc \quad (\alpha)$$

Remoción total  $R_t$ :

$$R_t = (1 - C) + \frac{1}{V_s} \int_0^C V dc \quad (\beta)$$

Al graficar estos parámetros, se establece la curva teórica de velocidad de sedimentación versus eficiencia (figura 5.1).

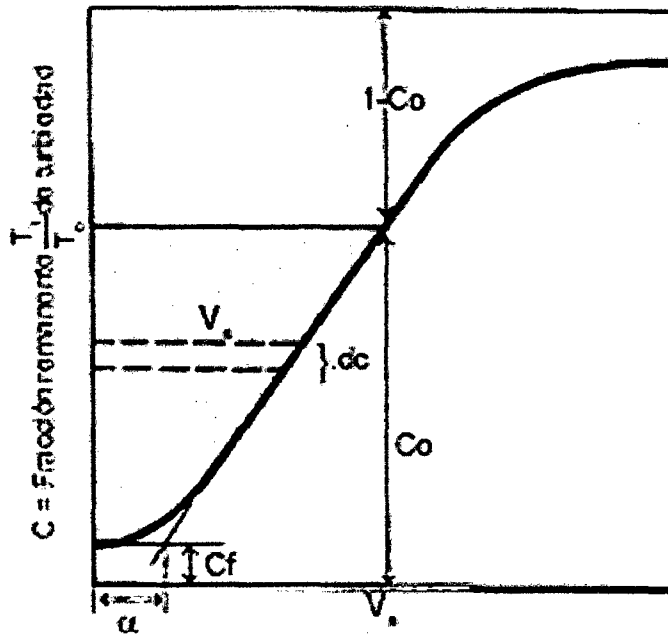


Figura 5.1 Curva de variación de eficiencia en función de la velocidad de sedimentación

La curva no pasa por el origen. Esto implica que siempre se tendrá una o fracción  $C_f$  de partículas que no serán removidas por el sedimentador aun

cuando se apliquen velocidades muy bajas de sedimentación. Esto implica, en la práctica, la necesidad de contar con una unidad posterior al sedimentador que sea capaz de remover estas partículas. En la planta de tratamiento de agua esta unidad es el filtro.

Otra característica de esta curva es la tendencia asintótica cuando esta se aproxima al eje de las ordenadas. Esta tendencia permite definir una velocidad de sedimentación mínima para aplicaciones prácticas de diseño. No tendrá ningún sentido práctico seleccionar velocidades de sedimentación menores a este valor mínimo, ya que se incrementaría el área de la unidad y no se conseguiría mayor eficiencia de remoción.

Entonces, si se tiene en cuenta que no todos los sólidos serán removidos en esta unidad, la curva no pasa por el origen y el primer término de la ecuación  $\beta$  es igual a:

$$(1 - C) = [1 - (C - C_f)]$$

El segundo término, a su vez, es igual al área sombreada de la figura 5.2

$$\frac{1}{V_s} \int_0^c V dc = \frac{a + V_s}{2V_s} (C_0 - C_f)$$

Por lo tanto, la remoción total será:

$$R_t = [1 - (C - C_f)] = \frac{a + V_s}{2V_s} (C_0 - C_f)$$

Conocido el porcentaje de remoción total alcanzada para cierta velocidad de sedimentación, es posible encontrar una velocidad de sedimentación que permita conseguir una remoción total para lograr una determinada calidad de agua efluente del decantador.



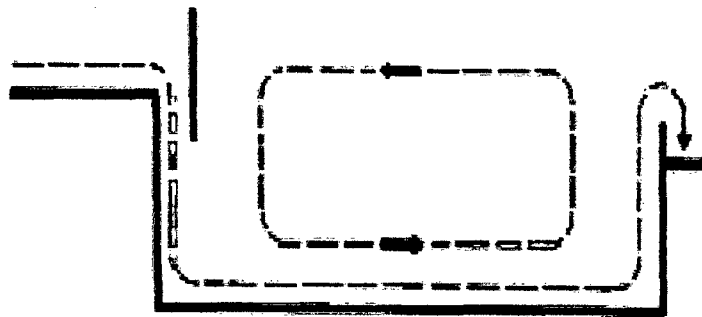
## 5.6 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO:

### 5.6.1 CALIDAD DEL AGUA:

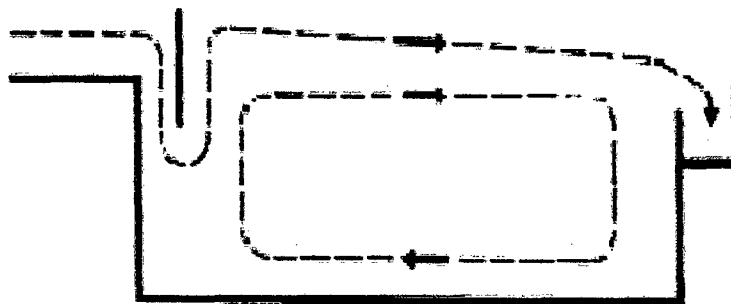
Las variaciones de concentración de materias en suspensión modifican, en primer lugar, la forma de sedimentación de las partículas (con caída libre o interferida), así como las propiedades de las partículas modifican la forma de depósito (sedimentación para partículas discretas y decantación para partículas floculentas).

Adicionalmente, variaciones de concentración de partículas o de temperatura producen variaciones de densidad del agua y originan corrientes cinéticas o térmicas que, a su vez, generan cortocircuitos hidráulicos en las unidades.

Al entrar agua más fría al sedimentador, la masa de agua se desplaza por el fondo de este y produce el tipo de corriente indicada en la figura 5.2



a) Corrientes térmicas debidas a agua fría



b) Corrientes térmicas debidas a agua caliente

Figura 5.2 Corrientes térmicas

En cambio, con agua más caliente, se produce el fenómeno inverso. En el caso de variar la concentración, se producen corrientes de densidad por

diferencias en las distintas masas de agua, que suelen crear fuerzas más importantes que las térmicas. En la figura 5.3 se indican las densidades del floculo producido con distintas concentraciones de suspensión de caolín.

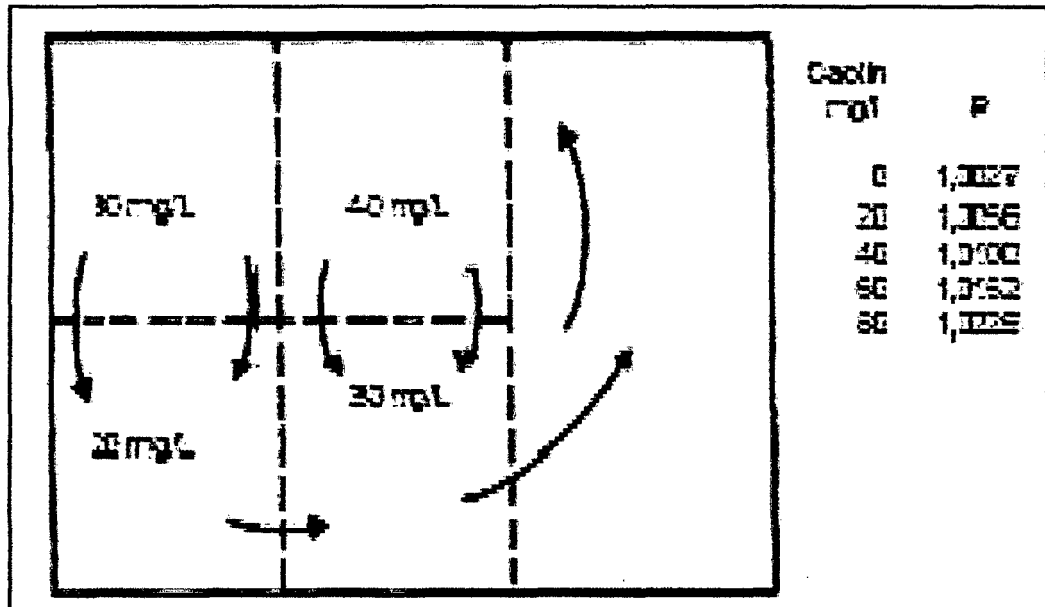


Figura 5.3 Corrientes de densidad.

### 5.6.2 FACTORES EXTERNOS.

Paradójicamente, los factores externos al proceso de sedimentación: acondicionamiento previo (procesos previos a la sedimentación), prácticas operacionales y factores ambientales son los que tienen más influencia en la eficiencia de un sedimentador o decantador. Buena o inadecuada coagulación y floculación ocasionan, respectivamente, altas o bajas eficiencias en los decantadores. Idéntico comentario cabe realizar acerca de la operación y el estado de la unidad, así como sobre los programas de mantenimiento existentes. A la vez, el viento, al soplar sobre la superficie de los sedimentadores, puede producir corrientes de suficiente intensidad como para inducir cambios en la dirección del flujo y alterar el precario equilibrio de las masas de agua.

En unidades grandes el viento puede crear oleajes de cierta magnitud, lo que interfiere el proceso o desequilibra la distribución del flujo en las canaletas de salida.

## CAPITULO 6. POLÍMEROS

### 6.1 DEFINICIÓN:

Los polímeros (del griego poli=muchos; meros=parte) son macromoléculas (generalmente orgánicas) formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros (del griego mono=uno y meros=parte) unidas por medio de enlaces químicos, generalmente covalentes, forman macromoléculas llamadas polímeros.

Ejemplo de monómeros:

- Los aminoácidos son los monómeros de las proteínas.
- Los nucleótidos son los monómeros de los ácidos nucleicos.
- Los monosacáridos son los monómeros de los carbohidratos.

Los polímeros no son especies químicas puras, porque no tienen un peso molecular, punto de fusión definidos. Son mezclas de especies, cada una con un peso molecular determinado y por lo tanto, para caracterizar una muestra de polímero no podemos determinar su peso molecular, sino su distribución de pesos moleculares.

### 6.2 POLIMERIZACIÓN Y ESTRUCTURA:

La polimerización es la reacción por la cual se sintetiza un polímero a partir de sus monómeros.

Según el mecanismo por el cual se produce la reacción de polimerización para dar lugar al polímero, ésta se clasifica como polimerización por pasos o como polimerización en cadena. En cualquier caso, el tamaño de la cadena dependerá de parámetros como la temperatura o el tiempo de reacción, teniendo cada cadena un tamaño distinto y, por tanto, una masa molecular distinta, por lo que se habla de masa promedio para el polímero.

### 6.3 CLASIFICACIÓN:

Existen varias formas posibles de clasificar los polímeros, sin que sean excluyentes entre sí.

#### 6.3.1 SEGÚN SU CARGA ELÉCTRICA

##### 6.3.1.1 POLÍMEROS NO IÓNICOS:

Son aquellos que no tienen carga eléctrica. Son exclusivamente poliacrilamidas de elevado peso molecular. Estos polímeros no iónicos se unen a los sólidos en suspensión por medio de puentes de hidrogeno.

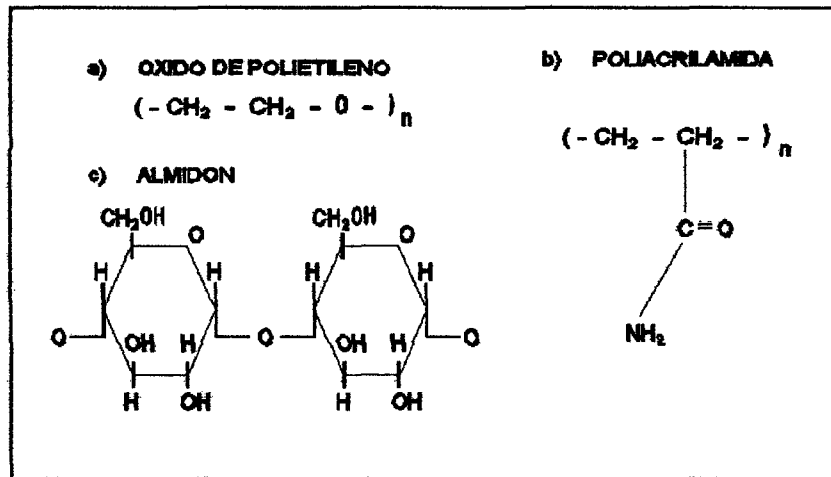


Figura 6.1 Polielectrolitos no iónicos

##### 6.3.1.2 POLÍMEROS ANIÓNICOS:

Son aquellos que tienen carga negativa. Los polielectrolitos aniónicos se caracterizan por su elevado peso molecular y por la coexistencia de grupos que permiten la adsorción de grupos ionizados negativamente (grupos carboxílicos o sulfúricos), cuyo papel consiste en provocar la extensión del polímero.

Estos polímeros pueden adherirse directamente a las partículas coloidales sobre todo en aquellas que poseen en su estructura iones metálicos, o bien

utilizando un mecanismo alternativo de unión entre partículas cargadas negativamente, y puentes catiónicos muy similares a los del sulfato de aluminio.

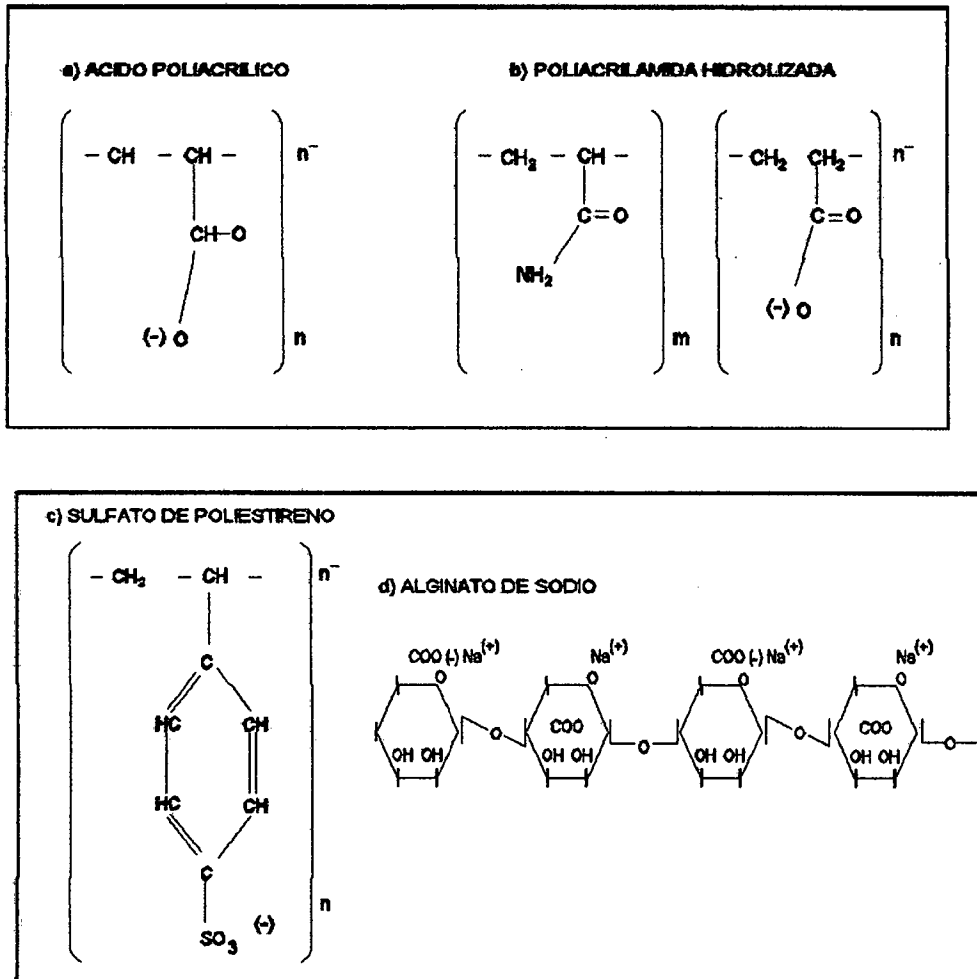


Figura 6.2 Polielectrolitos Aniónicos

### 6.3.1.3 POLÍMEROS CATIONICOS:

Son aquellos que tienen carga positiva. Los polielectrolitos catiónicos son macromoléculas de peso molecular bajo; poseen en sus cadenas una carga eléctrica positiva, debido a la presencia de grupos funcionales, amino, imina o de un amonio cuaternario.

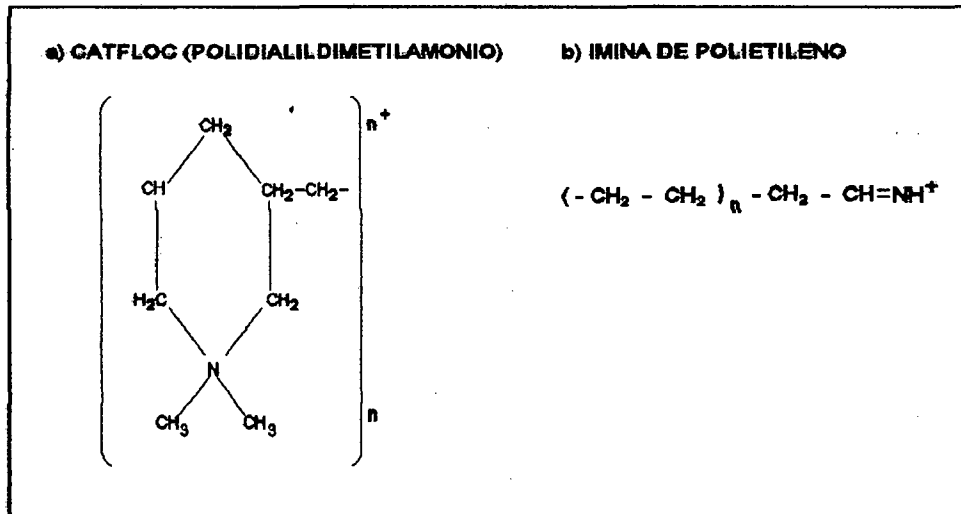


Figura 6.3 Polielectrolitos Catiónicos

### **6.3.2 SEGÚN SU ORIGEN**

#### **6.3.2.1 POLÍMEROS NATURALES:**

Son aquellos que se producen debido a las reacciones bioquímicas naturales en animales y plantas, y que muchas veces no tiene una sola composición química bien definida, ya que están constituidas principalmente por varios tipos de polisacáridos tales como el almidón, la celulosa, glucósidos, etc.; proteínas como son la caseína gelatina; y los ácidos nucleicos.

Muchos de estos componentes tienen propiedades coagulantes o floculantes y son usados por los nativos en forma empírica para clarificar el agua, como pasa con la penca de la tuna o nopal (que se emplea en las sierras del Perú y en México) o con las semillas de nirmalí (utilizados en la India).

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

El cuadro 4 incluye algunos de los productos naturales más conocidos que poseen propiedades coagulantes o floculantes. Cabe aclarar que existen otros productos procedentes de distintas regiones de América Latina y del mundo que podrían ser empleados para este propósito.

La introducción de un nuevo producto natural en el tratamiento de aguas 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, por lo que toxicidad de estos polímeros es, por lo general, mínima o nula, puesto que son usados como comestibles o como aditivos en diversos productos

alimenticias, por lo cual es evidente que su empleo pueda resultar más atractivo que el de los polímeros sintéticos, considerando, también, el aspecto económico.

Cuadro 4 Polímeros naturales que tienen propiedades Coagulantes o floculantes

<b>Nombre común</b>	<b>Parte de donde se extrae</b>	<b>Parte de donde se obtiene</b>
Alginato de sodio	Algas pardas marinas (Phaeophyceae)	Toda la planta
Goma de tuna	Opuntia ficus indica	Las hojas (Cladodios)
Almidones solubles en agua fría (pregelatinizados)	Maíz Papa Yuca Trigo	El grano del tubérculo
Goma de semillas de nirmalí	Strychnos Potatorun	Las semillas
Pulpa de algarrobo	Quebracho, acacia o algarrobo Schinopsis Lorentzii	Corteza del árbol
Gelatina común	Animales	Residuos animales Huesos
Carboximetil celulosa	Árboles	Corteza del árbol
Goma de Guar	Cyanopsis Psoralioides	Semillas
Lentejas	Lens esculenta Gajanus indicus Phassolus roxborghii	Semillas
Tamarindo	Árbol de fruto tropical	Semillas
Sílice activada	Silicato de sodio	Activación con un ácido

### 6.3.2.2 POLÍMEROS SINTÉTICOS:

Son compuestos orgánicos producidos por medio de la transformación química de derivados del carbón y del petróleo. Incluye la mayoría de los



polímeros manufacturados por la industria y de mayor venta comercial. Muchos aunque no todos, se encuentran en forma de polvo seco, generalmente constituido por poliacrilamida (no aniónico), o poliacrilamida hidrolizada (aniónico).

Los polímeros catiónicos, son derivados de bases de amonio cuaternario o de imina de polietileno, que generalmente se expenden en solución acuosa, en concentraciones del 10% al 60%.

Uno de los más antiguos polielectrolitos sintéticos usados es la sílice activada, que se prepara haciendo reaccionar una solución diluida de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  con cualquiera de los siguientes compuestos: ácido sulfúrico o silicato de sodio, solución de sulfato de aluminio, sulfato de amonio, cloro, bicarbonato de sodio, o bióxido de carbono. Estos compuestos se denominan agentes activadores y son los que promueven la polimerización del  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . La extensión de este proceso depende del porcentaje de neutralización del silicato de sodio y se incrementa con el tiempo. Si se deja que se complete, se forma un gel o pasta que puede tapan los conductos en el sistema de dosificación, lo que crea serios problemas operativos. Este es el motivo por el cual este polímero no se usa hoy en día.

La toxicidad de los polielectrolitos sintéticos, debe investigarse y someterse a un exigente control de calidad, pues a veces, los monómeros utilizados en la producción de polímeros sintéticos, no pueden usarse en el tratamiento de agua potable

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

#### **6.4 MODO DE ACCIÓN DE LOS POLÍMEROS**

La coagulación ha sido definida como la desestabilización eléctrica de las partículas, y la floculación, como la unión de las mismas para formar el flóculo o grumo. Teniendo en cuenta esta definición, los polímeros pueden ser

añadidos al agua de tres maneras distintas:

#### **6.4.1 COMO COAGULANTES:**

En este caso el polímero es agregado al agua como único coagulante, en reemplazo del coagulante metálico.

#### **6.4.2 COMO AYUDANTE DE COAGULANTES:**

En este caso el polímero es agregado inmediatamente después del coagulante metálico.

#### **6.4.3 COMO AYUDANTE DE FLOCULACIÓN:**

En este caso el polímero es agregado después del coagulante metálico.

Aunque existe una tendencia generalizada a no hacer distinciones entre ayudantes de coagulación y ayudantes de floculación, es probable que el mecanismo de coagulación/floculación sea diferente, según se agregue el polímero antes o después del coagulante metálico. (\*)

En la práctica, la mayoría de los polímeros se usan como ayudantes de floculación, puesto que estos son agregados de 30 a 60 seg. después del coagulantes (generalmente una sal de aluminio o hierro), cuando las partículas ya se encuentran desestabilizadas (\*). En esta forma, se evita que parte de las partículas producidas por los coagulantes metálicos, sean absorbidas por los sitios disponibles por los coagulantes en las cadenas poliméricas y pierden así su capacidad de desestabilización de los coloides causantes de la turbiedad. Sin embargo, no existe manera para conocer de antemano si un determinado polímero puede ser más efectivo como ayudante de coagulación, o de floculación. Esto solo puede conocerse mediante cuidadosos ensayos de laboratorio, utilizando el agua con la cual se va a trabajar.

---

( \* ) Según documento Técnico del CEPIS "Polímeros Naturales y su Aplicación como ayudante de Floculación"

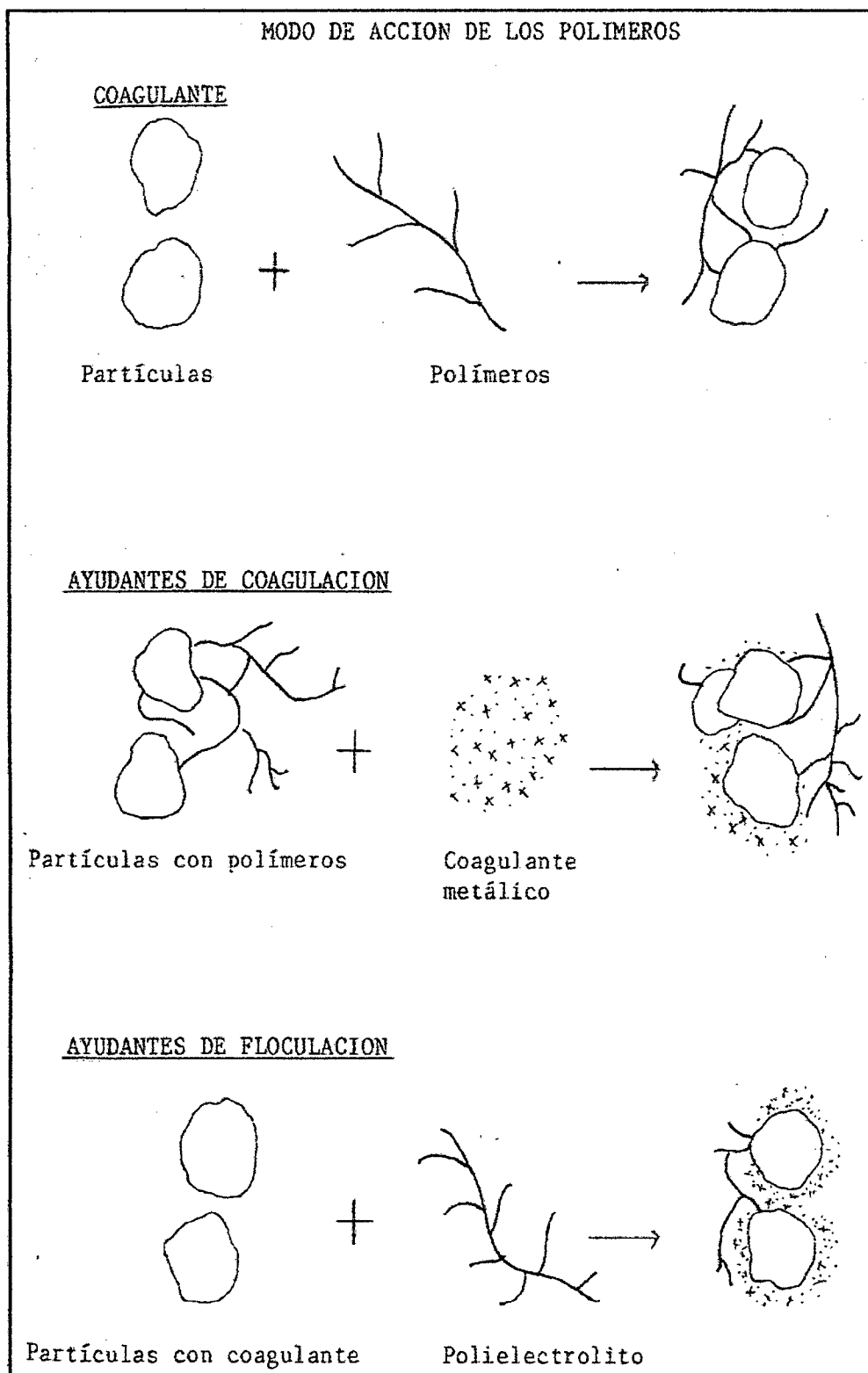


Figura 6.4 Modo de Acción de los Polímeros

Para cada polielectrolito existe una dosis óptima, cualquiera sea el modo de empleo. Si se sobrepasa esta dosis, puede producirse una reestabilización de

los coloides y un desmejoramiento de la calidad del agua tratada.

En general, se ha encontrado que los polímeros catiónicos son más efectivos como coagulantes primarios que los aniónicos o no iónicos (Coagulant Aids for Water Treatment, 1973), porque la atracción electrostática interparticular ayuda en este caso a la adsorción mutua del polímero y los coloides. La dosis que se requiere para que actúen en esta forma es relativamente alta, pero menor que la de los coagulantes metálicos. Por ejemplo, la dosis máxima recomendada para el "Catfloc" (producto comercial cuyo nombre químico es polidialildimetilamonio) es de 7mg/l. La ventaja de este producto es que reduce el volumen de los lodos decantados en comparación con los producidos por el hidróxido de aluminio o de hierro. También el "Flocctan" se ha usado con éxito como coagulante primario.

La turbiedad y el color en el agua actúan como coloides de carga negativa y existe la tendencia a que la carga positiva producida por los coagulantes metálicos la neutralice. Sin embargo, este no es el único mecanismo de coagulación. Las fuerzas químicas pueden ser tanto o más importantes que las físicas; los complejos solubles y los hidróxidos precipitados de las sales metálicas pueden reaccionar químicamente con la turbiedad coloidal.

Los polímeros pueden así adsorberse en la superficie de las partículas coloidales, causando una reducción de sus cargas (en el caso de polielectrolitos catiónicos) o creando puente de unión entre los microflóculos que se forman después de agregadas las sales metálicas.

Esto explicaría porque los polielectrolitos aniónicos pueden interrelacionar también con partículas de turbiedad de carga negativa, ya que lo predominante en estos casos es la acción del puente químico (figura 6.4). En algunos estudios experimentales se ha encontrado inclusive que los polielectrolitos aniónicos pueden servir como coagulantes primarios.

## **CAPITULO 7. ALGINATO DE SODIO**

### **7.1 GENERALIDADES**

En 1883, el Dr. E.C.C. Standford, científico escocés, quien encontró una sustancia con aspecto gelatinoso que denominó Alginato, poseía varias propiedades interesantes como espesante, formador de geles y de películas, a partir de estos estudios él propuso varias aplicaciones industriales aunque la producción a gran escala fue desarrollada mucho después, Krefting (1896) obtuvo ácido algínico puro, e investigadores posteriores determinaron muchas de las propiedades de las sales de este ácido. Sin embargo, la producción comercial de alginatos no comenzó hasta el año 1929 por la compañía Kelco en California, y tuvo un notable incremento después de la segunda guerra mundial con la instalación de empresas extractoras en todo el mundo (Noruega, Francia y Japón, etc.), la continuación de la investigación y su ampliación dio lugar a una gran cantidad de datos sobre la estructura del ácido algínico, las propiedades de sus soluciones y las reacciones químicas de los alginatos.

La variedad de compuestos algínicos de que se dispone en la actualidad son el resultado de una intensiva tarea de investigación, desarrollo, marketing y programas de servicio que se han extendido durante un período de cerca de treinta años en los principales países productores.

### **7.2 FUENTE DE OBTENCIÓN**

Los Alginatos se obtienen de algas marinas del grupo Phaenophyceas (algas pardas - Feolíceas) que tienen una gran variedad de especies que crecen en costas rocosas y aguas relativamente tranquilas.

Las algas usadas para la extracción de alginatos son diferentes en cada región.

Se distribuye principalmente en el hemisferio sur, excepto en la Antártida, (Sudamérica, Sudáfrica, Australia y Nueva Zelanda) y en las costas orientales

del Pacífico Norte.

En América se distribuye en Perú, Patagonia y Tierra del fuego al Sur y desde Santa Bárbara California a Punta San Hipólito México, en las costas de California se usa el género *Macrocystis*, en las costas australianas el *Macrocystis* y *Eklonia*.

Fue introducida en aguas asiáticas en 1978 por científicos Chinos, también se ha cultivado en el Atlántico Norte.

En Sudamérica, desde Ecuador hasta Chile y en la Costa Sur de Argentina, abundan las especies *Macrocystis Pyrifera*, *Durvillea* y *Lessonia Nigrecens* Bory; crecen en matas coposas de 1 a 2 metros de diámetro y se desarrollan hasta la superficie del mar. La producción es permanente y se pueden cosechar por medio de equipos especiales hasta cuatro veces por año.

La morfología de las algas pardas es muy variable, podemos encontrar especies filamentosas pequeñas, como aquellas del género *Ectocarpus* hasta especies de estructura compleja y varios metros de longitud como es el caso de *Macrocystis*. En el caso de las algas Laminariales (*Lessonia*, *Macrocystis*, entre otras).



Figura 7.1 *Macrocystis Pyrifera* o Sargazo (Huiro)



Figura 7.2 Durvillaea Antártica o Cochayuyo



Figura 7.3 Lessonia Nigrescens o Huiro Negro.

### 7.3 ALGINATO DE SODIO

El Alginato de Sodio es una sal sódica soluble del ácido algínico, Tseng en 1945 sugirió llamarla Algina.

Los alginatos están constituidos en alto porcentaje por polisacáridos (alginas y otros), Los alginatos son sales de ácido algínico que pueden ser formadas con metales ligeros como Na, K, Mg o Fe (ferroso), que forman sales solubles en agua, dando así, alta viscosidad, o bien las sales pueden ser

formadas con metales pesados como Ca, Al, Zn, Cu, Cr, y Fe (férrico), que dan sales insolubles en agua.

El ácido algínico se acumula en las algas marinas en forma de "cuerpos gelatinosos" después de combinarse con las sales del agua de mar. Estos "cuerpos gelatinosos" llenan las células de las algas. La flexibilidad de las algas que crecen en el océano es el resultado de la flexibilidad de estos cuerpos gelatinosos, es decir, los alginatos dándole al alga su estructura típica.

#### 7.4 COMPOSICION:

Nombre químico: Sal sódica del ácido algínico

Formula Global :  $(C_6H_7NaO_6)_n$

Estudios (Vincent 1960; Frei 1962; Hirst, Persival y Wold 1964) demuestran que el ácido algínico está constituido por dos monómeros: los ácidos  $\beta$ -D-manurónicos (M) y el ácido  $\alpha$ -L-gulurónico (G), los que están unidos como copolímeros en cadenas del tipo  $(-M-)_n$ ,  $(-G-)_n$ ,  $(-M-G-)_n$  en la misma molécula, unidos por enlaces glucosídicos  $\beta$  (1-4) y  $\alpha$  (1-4).

Las regiones de bloques M corresponden a cadenas lineales, mientras que los bloques G presentan una estructura en forma de bucle.

El peso molecular del ácido algínico varía con el método de extracción y tipo de alga empleada. En el caso del alginato de sodio varía de 35 000 a 1,5 millones.

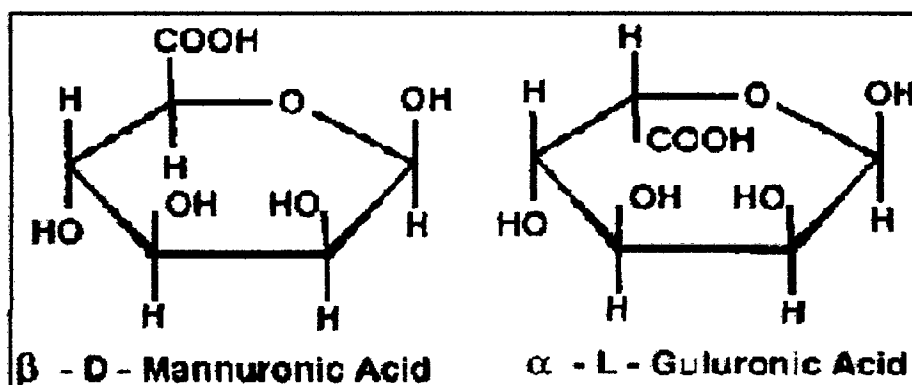


Figura 7.4 Formula química desarrollada de los monómeros que conforman la sal sódica del ácido algínico



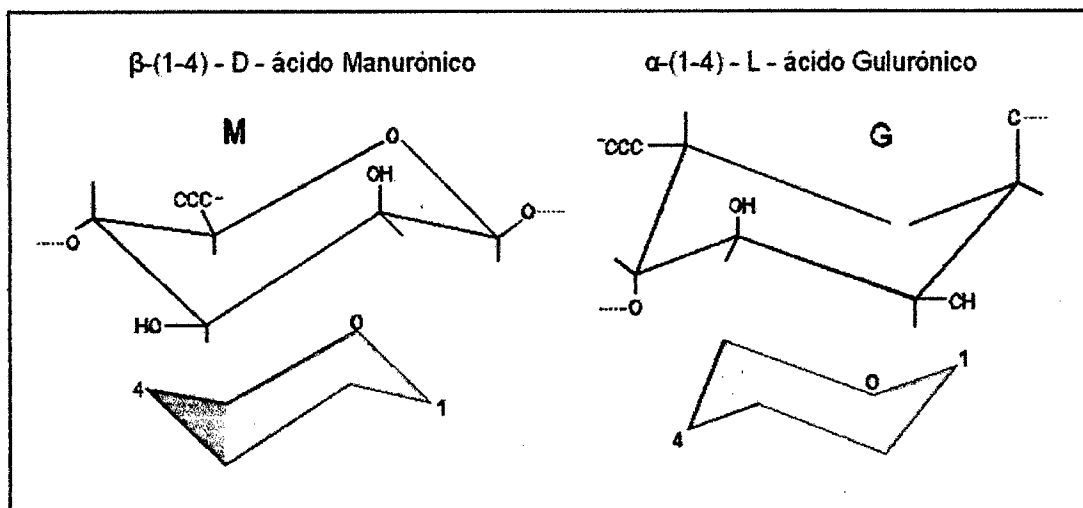


Figura 7.5 Fórmula química en forma de silla de los monómeros que conforman la sal sódica del ácido alginico

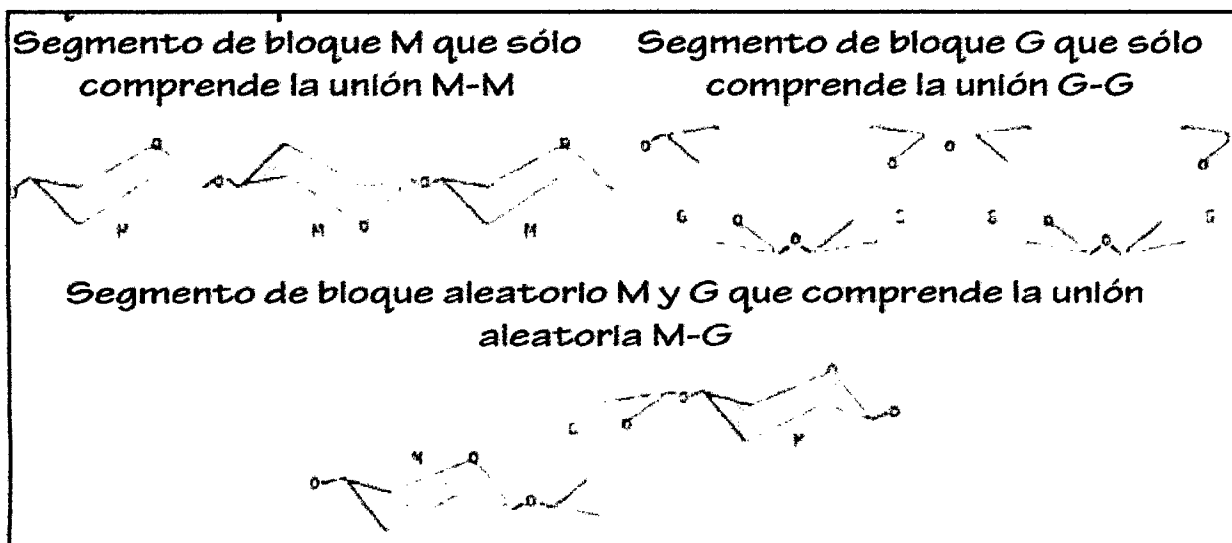


Figura 7.6 Configuraciones espaciales que adoptan los bloques tipo M y G

### 7.5 CARACTERÍSTICAS:

Polvo más o menos fino, prácticamente sin olor ni sabor y se disuelve en agua formando un mucílago espeso.

Es un agente espesante y emulsificante.

Presentación: Polvo fibroso o granulado, casi inodoro, de color blanco a amarillento

### 7.6 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS:

Las diferencias de la relación M/G y la configuración de bloque (MM, GG, MG, GM) explica las diferencias de las propiedades y funcionalidad del alginato, en especial, la capacidad gelificante y la fuerza de gel. A modo de referencia, la relación M/G depende de factores tales como la especie de la alga marina, la parte del alga marina utilizada, la ubicación costera y la estación de cosecha. Por ejemplo, el alginato obtenido de *Laminaria hyperborea*, con un alto porcentaje de segmentos poligulurónicos (ver cuadro 5) forma geles rígidos, con baja capacidad de unión de agua y tendencia a la sinéresis (pérdida de agua por proceso de exudación del gel, que produce su contracción). Por el contrario, el alginato de *Macrocystis Pyrifera* o *Ascophyllum*, forma geles elásticos, con baja tendencia a la sinéresis y capacidad de sufrir deformación.

Cuadro 5 Porcentajes de ácido manurónico y ácido gulurónico, y contenido de alginato para varias especies comerciales de algas pardas

Especie	% M	%G	M:G	Contenido de alginato de sodio (% sobre algas secas)
<i>Laminaria hyperborea</i>	30	70	0,45	25 -27
<i>Laminaria digitata</i>	55	45	1,20	20 - 26
<i>Macrocystis pyrifera</i>	60	40	1,50	26
<i>Ascophyllum nodosum</i>	65	35	1,85	26 - 28
<i>Lessonia nigrescens</i>	60	40	1,50	35
<i>Ecklonia máxima</i>	55	45	1,20	40

El grupo carboxilo, dentro de las unidades M y G, intercambia iones con facilidad, y puede reaccionar con varios tipos de cationes. Esto se traduce en cambios de las propiedades y la funcionalidad del alginato. Al utilizar estas reacciones químicas y los cambios de funcionalidad asociados, los alginatos tienen numerosas aplicaciones comerciales en diversas categorías.

Entre las propiedades físicas y químicas del ácido algínico y de sus sales (alginatos), entre las propiedades más importantes se tienen:

#### **7.6.1 SOLUBILIDAD:**

Soluble en agua con formación de una solución coloidal viscosa. Poco soluble en agua hirviendo.

Esta propiedad se ve afectada tanto por factores físicos como químicos, los que se analizan a continuación:

##### **Factores físicos:**

La solubilización de los compuestos de alginato se ve afectada tanto por el tamaño como por la forma de las partículas. Usualmente se prefiere un material basto o grosero cuyas partículas resultan más fáciles de dispersar y suspender, aunque tienen una baja velocidad de hidratación. Las partículas finas se disolverán más rápidamente, pero existe mayor riesgo de que se aglomeren; éste efecto puede disminuirse diluyendo el alginato en presencia de otro polvo, por ejemplo azúcar .

##### **Factores químicos:**

La solubilización de estos productos en agua resulta dificultosa si se realiza en presencia de compuestos que compiten con las moléculas de alginato por el agua necesaria para su hidratación. Así, la presencia de azúcares, almidón o proteínas en el agua reducirá la proporción de hidratación y se requerirán mayores tiempos de mezcla.

La presencia de pequeñas cantidades de cationes polivalentes inhibe la hidratación de los alginatos y proporciones elevadas de los mismos causan

su precipitación. El alginato sódico resulta de difícil disolución en aguas duras y leche debido a que ambas contienen iones calcio; éstos deben ser primero secuestrados con un agente complejante tal como el hexametáfosfato de sodio o ácido etilenediamino tetraacético (EDTA).

Los alginatos en general son insolubles en solventes miscibles con el agua como alcoholes y cetonas. Las soluciones acuosas (1%) de la mayoría de los alginatos toleran la adición de 10-20% de tales solventes; pero proporciones mayores impiden una correcta hidratación de las moléculas.

Soluble en soluciones acuosas a pH por encima de 3,5.

#### **7.6.2 VISCOSIDAD:**

Es la oposición de un fluido a las fuerzas tangenciales. Un fluido que no presenta viscosidad se llama fluido ideal.

Esta propiedad de las soluciones de alginato de sodio puede ser muy variable y es función de numerosos factores, entre los que cabe mencionar los siguientes:

##### **7.6.2.1 EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN:**

La viscosidad de las soluciones de alginato depende de la concentración, elevándose mucho a partir del 2% crece en forma logarítmica; Las soluciones de alginato tienen un comportamiento no newtoniano, con una viscosidad que disminuye mucho al aumentar la velocidad del movimiento. En ausencia de calcio, el alginato se pliega formando cada uno de los bloques constituyentes de las hélices mantenidas por puentes de hidrógeno.

##### **7.6.2.2 EFECTO DEL PH:**

Cuando el pH < 4, la viscosidad tiende a incrementarse por la disminución de la solubilidad del ácido algínico libre, el cual precipita en forma de gel a un pH de 3-3,5; y si el pH > 10 pierde rápidamente su viscosidad y tiende a volverse inestable.

La viscosidad de las soluciones de alginato de sodio es casi independiente del pH en el rango entre 5 y 10, por lo que en la industria se encuentra el alginato de sodio mayormente en un pH= 7,8

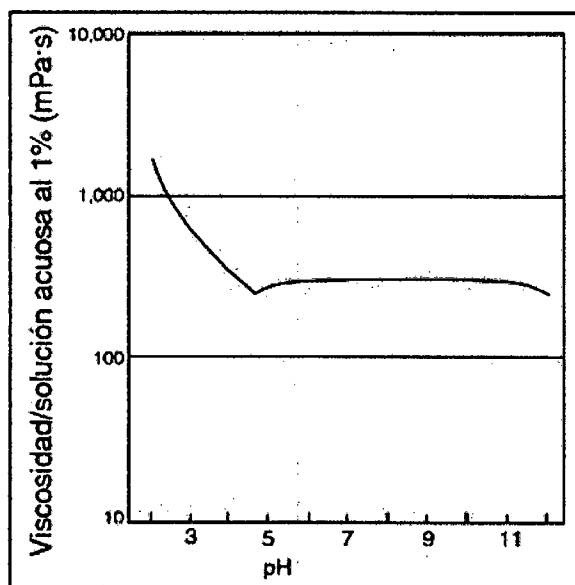


Figura 7.7 Viscosidad versus PH

### 7.6.2.3 EFECTO DEL PESO MOLECULAR:

La viscosidad de la solución acuosa de alginato de sodio depende directamente del peso molecular, es decir, del grado de polimerización del alginato de sodio.

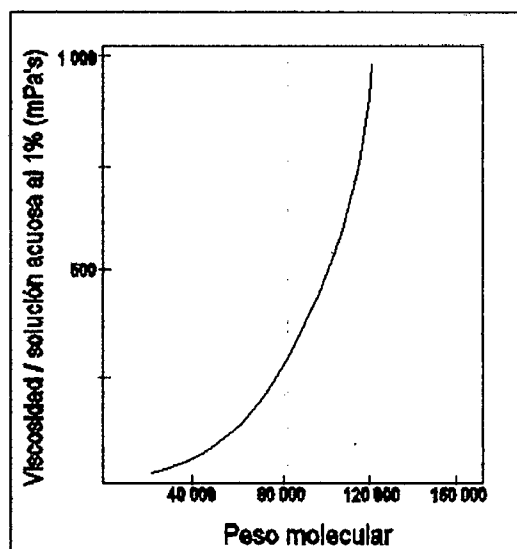


Figura 7.8 Viscosidad versus Peso molecular

#### 7.6.2.4 EFECTO DE LA TEMPERATURA:

El aumento de la temperatura reduce la viscosidad de la solución de alginato de sodio, por ejemplo la solución al 1% de alginato sódico, puede tener la viscosidad aproximada de 1000 centipoises a 17°C.

La temperatura no tiene mayores incidencias en las propiedades de congelación / descongelación.

A una temperatura 70°C disminuye la viscosidad, por cada grado de aumento de la temperatura, disminuyó en 2,5% la viscosidad (siendo la viscosidad irreversible).

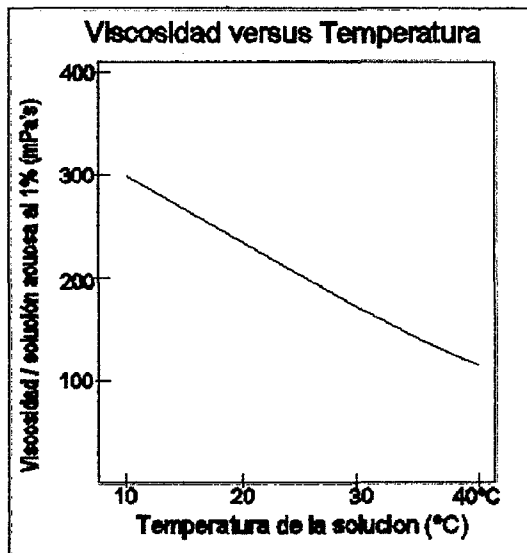


Figura 7.9 Viscosidad versus Temperatura

#### **7.6.2.5 FUERZA IÓNICA:**

La viscosidad de las soluciones de alginato de sodio decrece levemente por la adición de sales de cationes monovalentes. Como es frecuente con otros polielectrolitos, el polímero en solución tiende a contraerse al aumentar la fuerza iónica de la misma.

Un efecto contrapuesto se tiene al agregar a las soluciones de alginato cationes polivalentes, dentro de los cuales el calcio es particularmente importante: la viscosidad se incrementa al aumentar la concentración de los mismos (fácilmente forma un gel)

#### **7.6.2.6 GRADO DE AGITACIÓN:**

Es decir que la viscosidad de la solución decrece al aumentar el grado de agitación.

#### **7.6.3 HUMEDAD:**

El ácido algínico; cuando está húmedo absorbe varias veces su peso en agua es decir es higroscópico, si se seca, se endurece mucho, se vuelve resistente a los disolventes, no reduce la solución de Fehling (disolución que se utiliza como reactivo para la determinación de azúcares reductores, demostrar la presencia de glucosa y sus derivados), pero forma rápidamente sustancias reductoras cuando se seca a 100°C o se hierve con ácido diluido (HCl 2 N).

Humedad = 10,21 %, en condiciones normales el ácido algínico es muy higroscópico.

#### **7.7 USOS DEL ALGINATO DE SODIO:**

El alginato de sodio y sus derivados se utilizan en forma de hidrocoloide (material elástico en el que su fase dispersante es agua).

El alginato de sodio es considerado el mejor coloide usado como estabilizador y agente cremoso para los helados. Por eso el helado casero nunca queda igual al helado comercial. Tiene numerosas aplicaciones en la industria tales como la fabricación de aditivos alimentarios, productos farmacéuticos, cosméticos y textiles:

Cuadro 6 Aplicaciones del alginato de sodio

<b>APLICACIONES ALIMENTICIAS</b>	
<b>Espesante, estabilizante o propiedades de suspensión en:</b>	Jugos de fruta Salsas Cremas Cerveza
<b>Propiedades gelificantes en:</b>	Alimento para animales Gelatinas Relleno de aceitunas
<b>Propiedades de control en:</b>	Fabricación de quesos Helados Cubiertas de frutas en pastelería
<b>APLICACIONES FARMACÉUTICAS</b>	
<b>Propiedades espesantes en:</b>	Jarabes Emulsiones Lociones Cremas
<b>Características de rápida hidratación en:</b>	Desintegración de tabletas Control de irrigación de drogas
<b>Propiedades gelificantes en:</b>	Polvos de impresión dental
<b>APLICACIONES TEXTILES</b>	
<b>Propiedades espesantes en:</b>	Gomas para impresión Baños de tinta
<b>Propiedades de limpieza en:</b>	Sistemas reactivos de tinta Sistemas de dispersión de tinta
<b>OTRAS APLICACIONES INDUSTRIALES</b>	
<b>Propiedades de formación de película</b>	Industria de papeles calco Sellado de conservas
<b>Interacción con silicatos en:</b>	Electrodos de soldadura
<b>Propiedades espesantes y estabilizantes en:</b>	Barnices para cerámicas Pinturas cremosas

### 7.8 ALMACENAMIENTO:

En contenedores bien cerrados. En lugar seco como se menciona en el ítem título 7.6.3 con respecto a la humedad.

A pesar de las diferencias mencionadas en cuanto a estabilidad, todo compuesto algínico comercial deberá almacenarse en un lugar fresco a temperaturas de 25°C o menores, pues la elevación de la misma puede causar una significativa despolimerización que afecta las propiedades comercialmente útiles como la viscosidad y la fuerza de los geles. El área de almacenaje deberá también tener un medio de control de la humedad ambiente a fin de que el producto no supere su contenido usual de humedad (10-13%), lo que incrementa la despolimerización.



## CAPITULO 8. PARTE EXPERIMENTAL

### 8.1 DESCRIPCIÓN Y MATERIALES DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LOS PROCESOS:

#### 8.1.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO PARA LA PRUEBA DE JARRAS

Las pruebas de jarras son simulaciones en el laboratorio, de las operaciones de coagulación—floculación—sedimentación que se realizan en las plantas de tratamiento y purificación de aguas. Nos permite ajustar el pH, hacer variaciones en las dosis de las diferentes sustancias químicas que se añaden a la muestra, alterando velocidades de mezclado y recrear a pequeña escala lo que se podría ver en un equipo tamaño industrial, es decir nos permite poder analizar y obtener resultados referenciales sin la necesidad de tener que desarrollar una planta piloto lo que constituye un ahorro de tiempo y dinero.

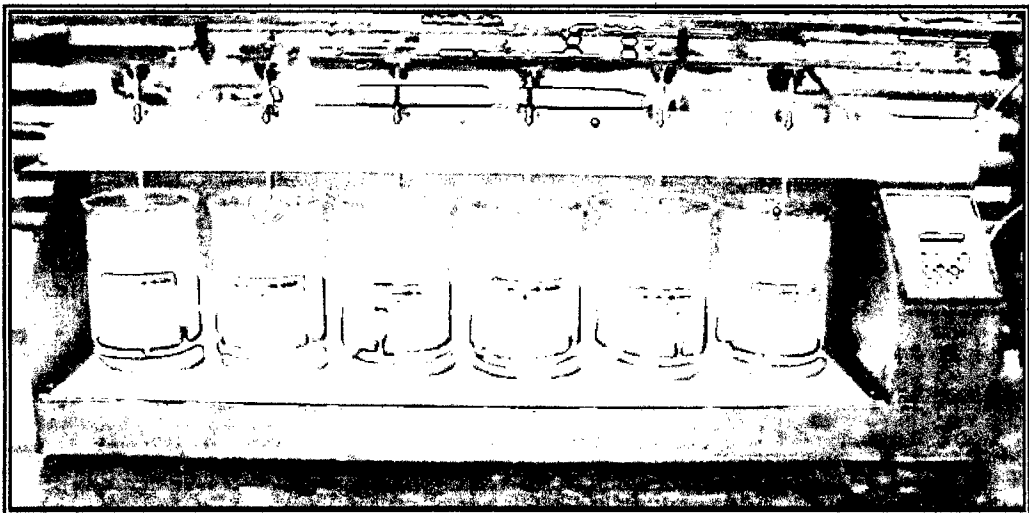


Figura 8.1 Equipo de prueba de jarras de Phips & Bird

Al igual que otras pruebas analíticas, el método ha sido estandarizado para facilitar la comparación y convalidación de los resultados.

A pesar de tratarse de volúmenes pequeños (2000ml) con flujo discontinuo y

de fácil control en cuanto a dosificación y volúmenes de agitación esta prueba sigue siendo el método más acertado para la determinación de las diferentes variables.

Para nuestra investigación se empleó un equipo de prueba de jarras de velocidad variable (de 0 a 300rpm) fabricado por Phips & Bird.

## **8.1.2 COMPONENTES DEL EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS**

### **8.1.2.1 SISTEMA DE DOSIFICACIÓN**

Las unidades de dosificación múltiple usada en la prueba de coagulación deben de ser equipadas con las facilidades necesarias para la adición de coagulantes químicos en forma rápida y simultánea a cada vaso o jarra.

La mayoría de los equipos comerciales olvidan este detalle que es la causa de muchos resultados erróneos.

Los estudios muestran que las diferencias que existe en el tiempo de adición de los reactivos químicos de las soluciones a los diferentes vasos, puede afectar significativamente los resultados, particularmente cuando se añaden ayudantes de coagulación. También puede alterar los resultados la velocidad de adición la cual debe de ser lo más rápido posible.

En esta investigación se empleó la técnica usada por el laboratorio del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) lo cual nos va facilitar que la velocidad de adición de las sustancias químicas sea lo más uniforme y rápido posible. Esta Técnica consiste en:

Por medio de una pipeta colocar las respectivas dosis del ayudante de coagulación y el coagulante en 6 vasos precipitados de 50 ml. y succionar el contenido de cada vaso, con una jeringa hipodérmica.

Luego se retirará las agujas de las jeringas. Se recomienda que se tenga 6 jeringas hipodérmicas para añadir el coagulante y otras 6 jeringas hipodérmicas para añadir el ayudante de coagulación.

Cuando se pone a funcionar el equipo en los 5 primeros segundos que es

donde ocurre la mezcla rápida es allí donde se inyecta el contenido de cada jeringa en su respectivo vaso precipitado de 2000ml lo más rápido posible; una vez hecha la mezcla rápida el equipo automáticamente disminuye la velocidad de rotación de las paletas y empezará la floculación del agua.

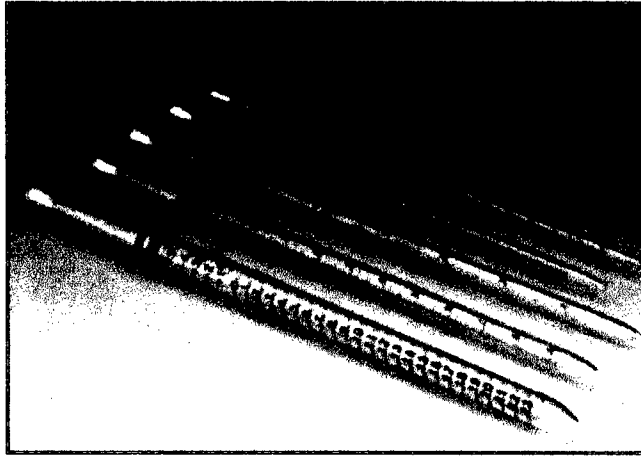


Figura 8.2 Pipeta graduada

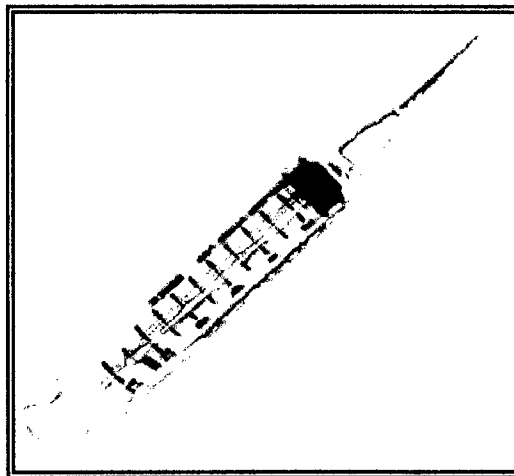


Figura 8.3 Jeringa hipodermica

Se recomienda aplicar la dosis muy cerca del agitador para que la dispersión sea más rápida y uniforme.



Figura 8.4 Con la pipeta tomar la dosis ya conocida de la sustancia

#### 8.1.2.2 SISTEMA DE AGITACIÓN:

La variable que más importancia tiene en la "Prueba de Jarras" es la intensidad de agitación expresada como gradiente de velocidad. En el equipo de prueba de jarras para lograr el movimiento del agua, se utilizan 6 paletas o rotores capaces de operar a velocidades de 0 a 300rpm, dichos rotores están accionados en forma mecánica. En la Figura 8.6 se puede observar la paleta mecánica.

También se dispone de 6 estatores o deflectores fijos de tipo discontinuo tales como muestra la figura 8.5, estos serán colocados en cada vaso precipitado de 2000ml. La finalidad del uso de estos deflectores es para eliminar el movimiento helicoidal que se generó por inercia durante la

floculación afectando dicho proceso y que se evidencia en una disminución de la eficiencia en la sedimentación.

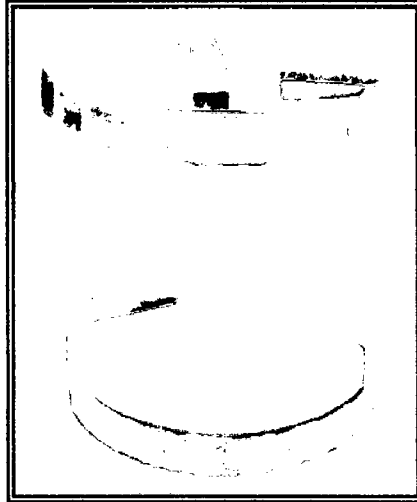


Figura 8.5 Deflector o estator

Las paletas o rotores utilizados poseen las siguientes características:

- Tipo de paleta : Plana – 1
- Nº de Paleta por jarra : 1
- Largo (cm.) : 7,6
- Alto (cm.) : 2,5
- Área Proyectada (cm<sup>2</sup>) : 19

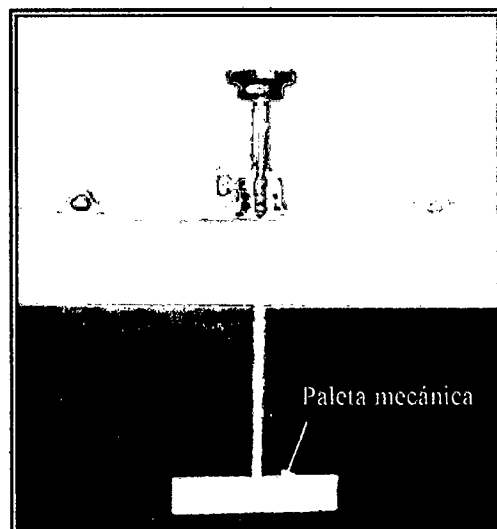


Figura 8.6 Paleta mecánica

### 8.1.2.3 ILUMINADOR DE FLÓCULOS:

Para observar mejor los flóculos en la base de los vasos precipitados es conveniente una buena iluminación.

Idealmente, los vasos deben estar provistos con una base blanca y una iluminación en ángulo recto a la dirección del observador, ver figura 8.7.

Se deben evitar fuentes de luz que generen mucho calor y tengan un efecto significativo en la coagulación y sedimentación, ocasionando diferencias de temperatura entre el agua del modelo y la realidad, lo cual redundaría en la obtención de resultados erróneos.

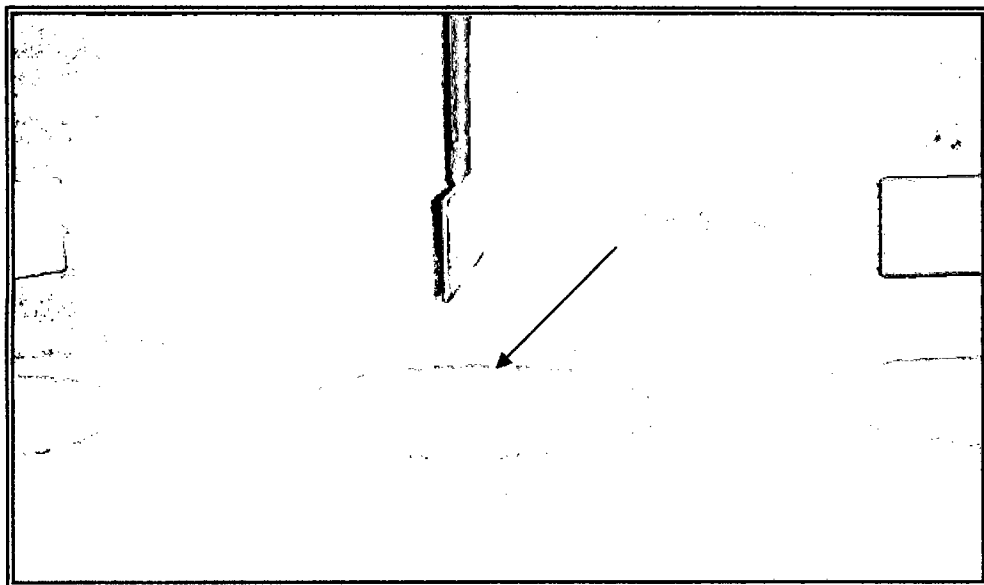


Figura 8.7 Base blanca con iluminación en ángulo recto

#### 8.1.2.3.1 DETERMINACIÓN DE LA GRADIENTE DE VELOCIDAD:

Ruey, Hudson, Singley y Camp determinaron los gradientes de velocidad para diferentes tipos de rotores y deflectores. En la figura 8.8 se muestra el ábaco correspondiente a jarras de 2 litros con o sin deflectores. Los valores indicados en el gráfico pueden ser modificados para cualquier temperatura o

volumen, siempre y cuando se mantengan las relaciones geométricas.

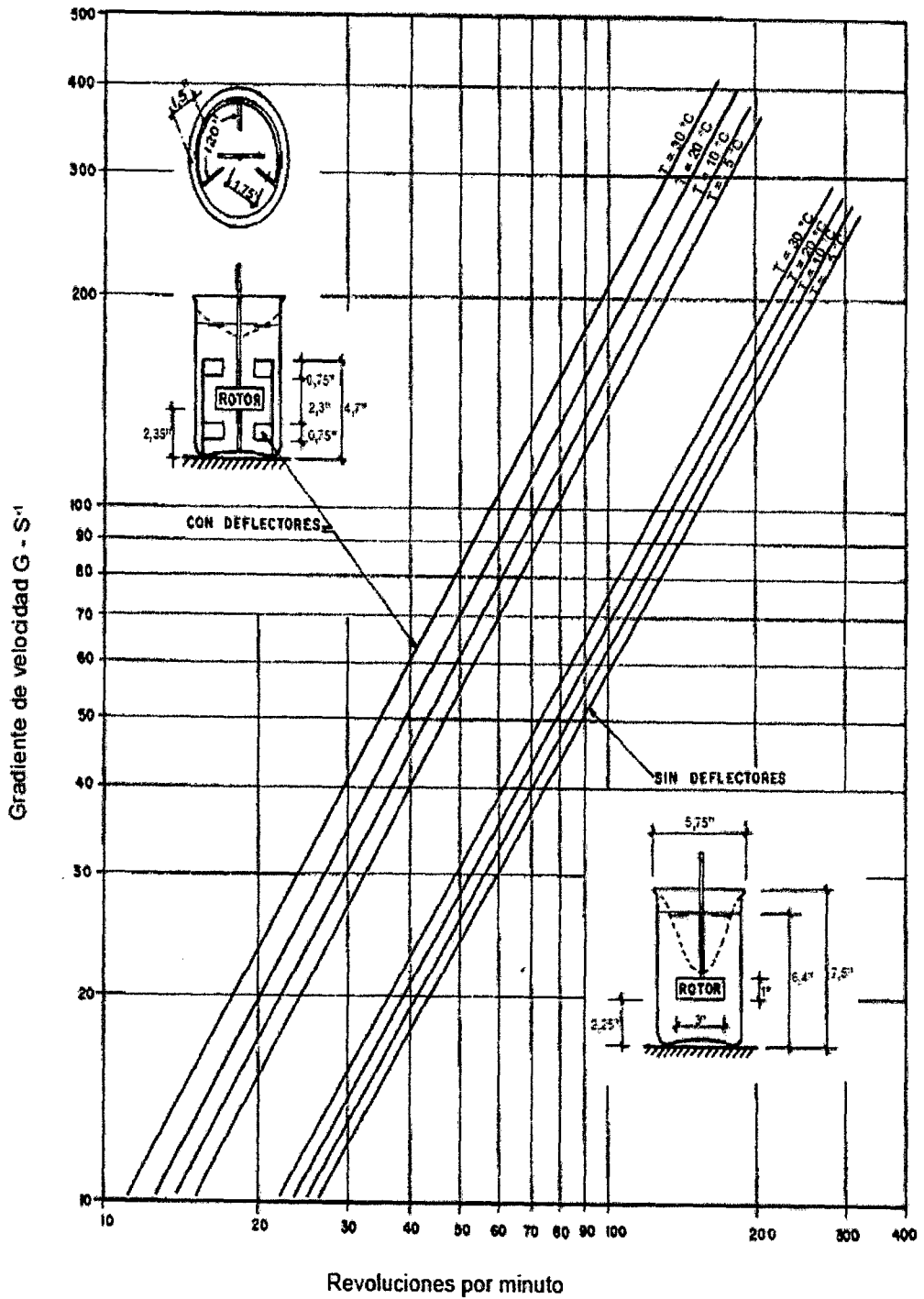


Figura 8.8 Ábaco de gradiente de velocidad Vs las revoluciones por minuto de un equipo de pruebas de jarras

#### 8.1.2.4 DESCRIPCIÓN DE LAS JARRAS

Las jarras que se emplearon tienen una capacidad de 2000 ml., son de cristal refractario, tal como se muestra en la figura 8.9, en caso de no tenerse vasos de este tamaño, podría optarse por vasos de 1000 ml. Se debe evitar usar vasos más pequeños debido a la dificultad en la adición de pequeños volúmenes de coagulantes y ayudantes para obtener muestras satisfactorias del agua sedimentada.

Las medidas estándar de los vasos de precipitados de 2000ml son las siguientes:

- Diámetro del borde : 14,5 cm
- Diámetro exterior de la base : 12,6 cm
- Diámetro interior : 12,5 cm
- Altura : 19,3 cm

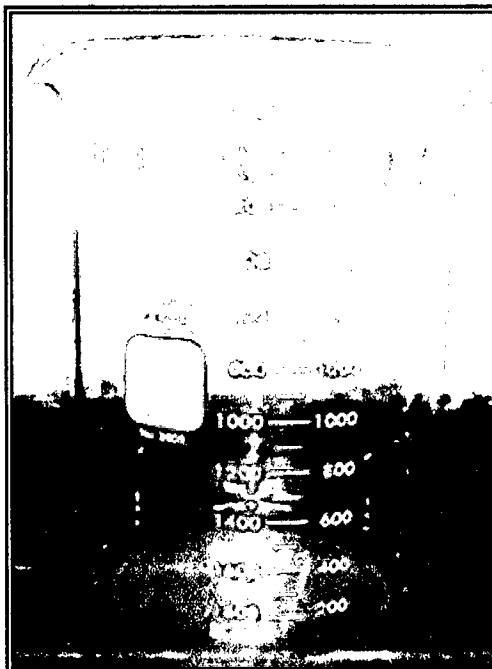


Figura 8.9 Vaso de precipitado



### 8.1.2.5 SISTEMA DE TOMA DE MUESTRAS

Una vez culminada la mezcla rápida y la floculación se tiene que sedimentar durante 10 min. Luego se toma la muestra con la ayuda de sifones en total 6 uno para cada vaso precipitado asegurando así que la toma sea a la misma altura en todos los vasos, teniendo la misma velocidad de entrada para así disminuir la posibilidad de arrastre de partículas.

El sifón está compuesto por un tubo de vidrio y una manguera ambos de 4mm de diámetro. Para poder quitar el aire atrapado en la manguera del sifón se empleara una jeringa hipodérmica garantizando así una continuidad en el flujo durante la toma de muestra.

El tubo de vidrio debe ser torcido en dirección horizontal en el punto de muestreo, para que esta sea representativa en una profundidad determinada. Asimismo, debe ser sostenido por un flotador de tecnoport cuya función es mantener constante la altura de toma de muestra y el nivel de agua, en la Figura 8.11 se muestra detalladamente la profundidad a la que debe ir colocado en el vaso precipitado.

Antes de tomar la muestra, se debe de descartar a través del sifón aproximadamente 10 ml de agua y luego tomar algo más de 30 ml de muestra para la determinación de la turbiedad final.

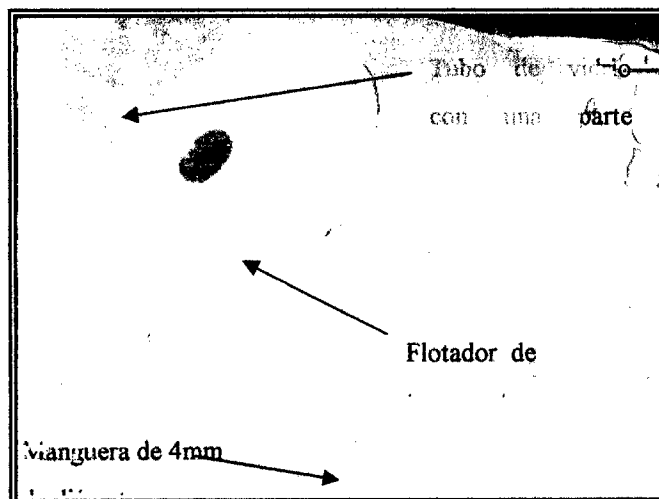


Figura 8.10 Sifón con sus componentes

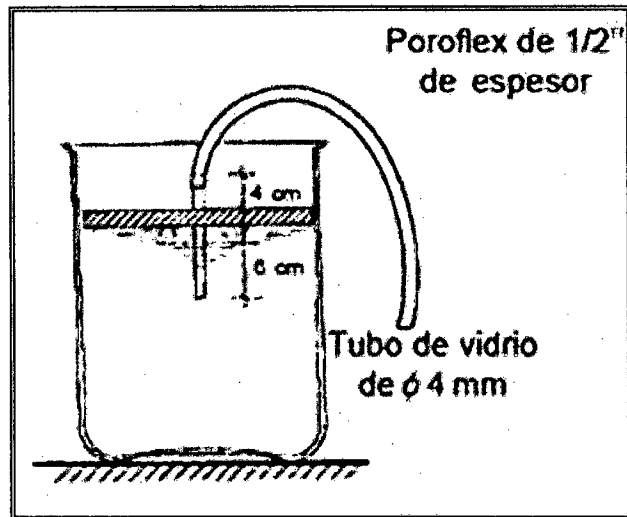


Figura 8.11 Manera de colocación del sifón en el vaso de precipitado

### 8.1.3 EQUIPO AUXILIAR:

Se empleó también:

#### 8.1.3.1 CRONÓMETRO:

El cronómetro es un reloj o una función de reloj utilizado para medir las fracciones temporales y precisas que demora las diferentes operaciones que comprenden las pruebas de coagulación, sedimentación, toma de muestra. El cronómetro que se empleó es de la marca Casio, (Figura 8.12).

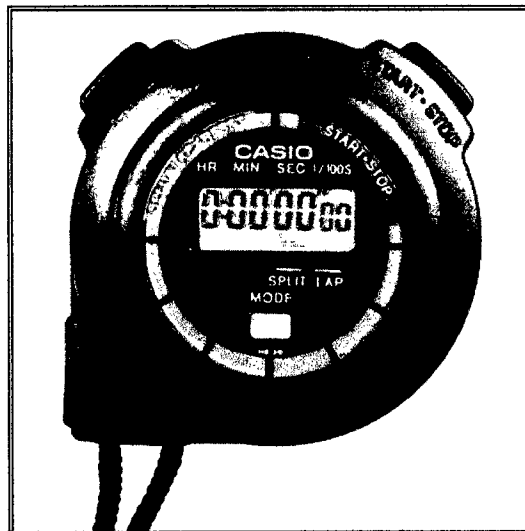


Figura 8.12 Cronómetro

#### 8.1.3.2 VIDRIERIA:

Además de los seis vasos de precipitado o jarras adecuadas que de preferencia son de 2 litros de capacidad, debe disponerse de pipetas de Mohr de 2 y 10 ml para la adición de coagulantes a los vasos, seis frascos de vidrio de 120 ml, dos buretas con sus respectivos soportes y, por lo menos, 6 vasitos de 50 ml por corrida. En lo posible, esta prueba debe efectuarse a la misma temperatura que tiene la planta de tratamiento y es necesario controlarla en diferentes puntos del proceso, para lo cual es conveniente tener un termómetro adecuado.

#### 8.1.3.3 PEACHÍMETRO:

El peachímetro que se utilizó es de la marca CORNING, modelo 350 (Figura 8.13). Es un equipo que consta de un electrodo de vidrio con lectura digital que se utiliza para determinar la acidez o la alcalinidad que posee cada sustancia además también nos mide la temperatura.

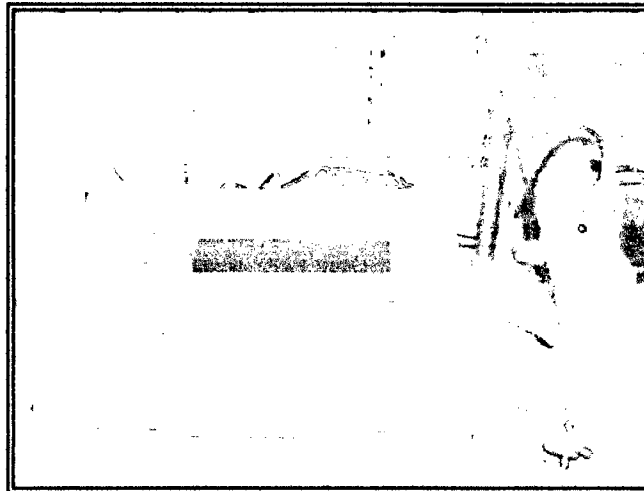


Figura 8.13 Peachímetro marca CORNING

#### 8.1.3.4 TURBIDÍMETRO:

La medición de la turbiedad del agua se considera como el parámetro más importante para caracterizar los procesos. En nuestro análisis la medición de

la turbiedad es importante porque nos da una idea de que tan efectivo es nuestro ayudante de coagulación.

La medición de la turbiedad se logra mediante el uso del Turbidímetro de Laboratorio HACH modelo 2100N (figura 8.14), mide la turbidez de 0 a 4000 UNT (unidades nefelométricas de turbidez). Las soluciones de mayor nivel de turbidez se miden diluyendo la muestra.

El principio es que mide la intensidad de la luz que pasa a través de una muestra de agua o la intensidad de la luz que es dispersada por las partículas en suspensión que están presentes en la muestra, generalmente desde una dirección situada a 90° de la dirección original del haz de luz.

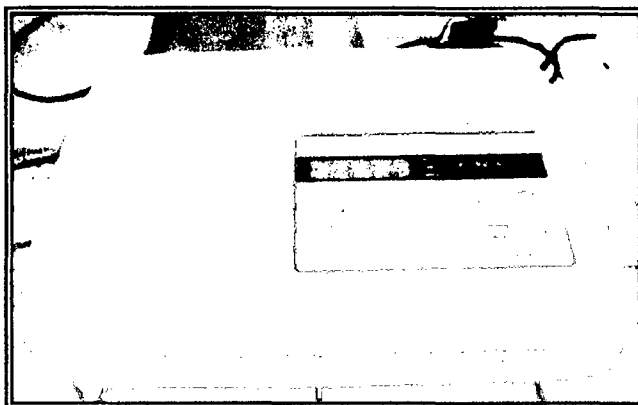


Figura 8.14 Turbidímetro HACH 2100N

#### 8.1.3.5 AGITADOR MAGNÉTICO:

Consta de una pequeña barra magnética (llamada barra de agitación) la cual está normalmente cubierta por una capa de plástico (usualmente Teflón) y una placa debajo de la cual se tiene un magneto rotatorio o una serie de electromagnetos dispuestos en forma circular a fin de crear un campo magnético rotatorio. Es muy frecuente que tal placa tenga un arreglo de resistencias eléctricas con la finalidad de dotarle de calor necesario para calentar algunas soluciones químicas. Durante la operación de un agitador magnético típico, la barra magnética de agitación (también llamada pulga, frijol o bala magnética) es deslizada dentro de un contenedor ya sea un matraz o vaso de precipitados de vidrio borosilicato, preferentemente

conteniendo algún líquido para agitarle. El contenedor es colocado encima de la placa en donde los campos magnéticos o el magneto rotatorio ejercen su influencia sobre el magneto recubierto y propician su rotación mecánica.

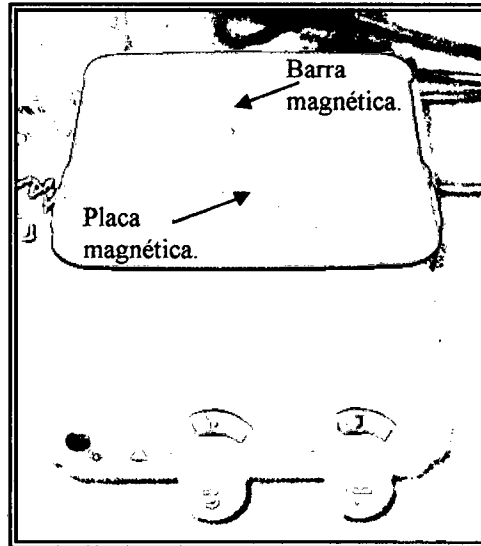


Figura 8.15 Agitador magnético

#### 8.1.3.6 **BALANZA ELECTRÓNICA.**

Son utilizadas para realizar mediciones con gran exactitud. La característica principal de este tipo de balanzas es su precisión, también son muy sensibles y exactas.

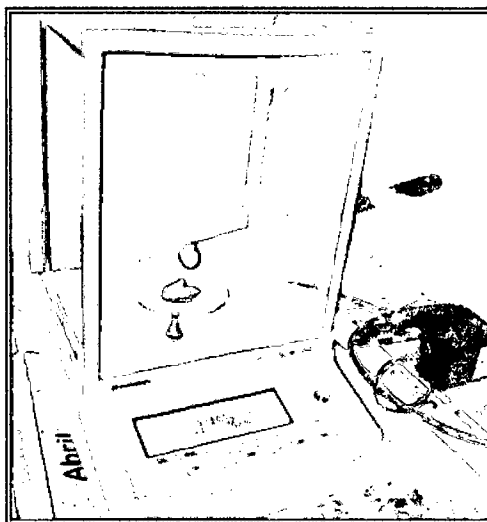


Figura 8.16 Balanza electrónica

## 8.2 PRECAUCIONES Y LIMITACIONES:

Con la prueba de jarras se trata de reproducir las condiciones en las cuales se desarrollan los procesos de mezcla rápida, floculación y sedimentación en la planta de tratamiento. Sin embargo, dado el pequeño volumen (1 a 2 litros) que tienen los vasos de precipitado, en comparación con el gran volumen de los tanques de floculación reales, la prueba de jarras constituye una reproducción parcial del proceso. Las razones para esto son de orden físico y químico, entre otras son las siguientes:

a) En los reactores existe un flujo continuo; en cambio, en las jarras no hay flujo. Esto hace que en los primeros, la masa de agua sufra un tratamiento desigual, debido a que parte de ella queda retenida (espacios muertos), mientras que otra parte pasa casi de inmediato. En cambio, en la prueba de jarras el agua queda retenida durante todo el tiempo que dura el ensayo (reactor del tipo de tanda o cochada).

b) La escala de las jarras no guarda relación con la escala del flóculo, por cuanto este se produce a escala natural y, en cambio, las jarras son cientos de veces más pequeñas que los floculadores. Por tanto, la proporción entre la escala de la turbulencia que se produce en uno y otro caso y el tamaño del flóculo es diferente, lo que afecta la velocidad de aglutinamiento de las partículas.

c) La dosificación de los coagulantes y la agitación de la masa de agua pueden ser mucho mejor controladas en la prueba de jarras que en la planta de tratamiento.

No obstante de estas deficiencias, la prueba de jarras sigue siendo el método más usual de los que hasta ahora disponemos para controlar los factores químicos involucrados en los procesos de coagulación, floculación y decantación. El hecho de que la prueba de jarras sea un ensayo rutinario en la operación de las plantas de tratamiento de agua potable no significa que pueda ejecutarse descuidadamente, lo que por desgracia suele ser bastante común.

## **CAPITULO 9. METODOLOGÍA DE TRABAJO:**

### **9.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS**

Las muestras preparadas en el laboratorio fueron caracterizadas antes de iniciarse los ensayos.

Las características principales de dichas aguas están dadas por los parámetros físicos y químicos que se indican a continuación:

- Turbiedad.
- PH.
- Alcalinidad total.
- Dureza total.

La determinación de cada uno de estos parámetros se realizó siguiendo las metodologías indicadas en los anexos, según como lo señala en los METODOS NORMALIZADOS PARA EL ANALISIS DE AGUAS POTABLES Y RESIDUALES.

<b>ANALISIS</b>	<b>METODOLOGÍA</b>
<b>Turbidez</b>	<b>Método Nefelométrico</b>
<b>pH</b>	<b>Método Electrométrico</b>
<b>Alcalinidad total</b>	<b>Método Titulométrico</b>
<b>Dureza total</b>	<b>Método Titulométrico EDTA</b>

**Cuadro 7      Cuadro metodología de análisis**

## **9.2 METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS A NIVEL DE LABORATORIO**

### **9.2.1 UTILIZACIÓN DEL ALGINATO DE SODIO PARA DIFERENTES TURBIEDADES EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN**

En el laboratorio se analizó como actúa el alginato de sodio en el proceso de la coagulación para diferentes turbiedades. Lo cual se estudió con los resultados que se obtuvieron de la turbiedad final del proceso sin utilizar el alginato de sodio como ayudante de coagulación.

Para ello fue necesario trabajar inicialmente con seis (06) tipos diferentes de agua preparadas, variando una de sus características en este caso la turbiedad. Obteniéndose las turbiedades de 50, 100, 150, 200, 300 y 400 UNT.

En esta etapa inicial, es el alginato de sodio lo único que se dosificó al agua preparada para la reducción de la turbiedad.

El ensayo que se realizó fue:

- Determinación de la dosis óptima del alginato de sodio.

Una vez obtenida la dosis óptima para las muestras de agua con diferentes turbiedades, se procedió a ver la eficiencia de la remoción de la turbiedad.

Habiéndose visto la eficiencia de la remoción de la turbiedad del alginato de sodio se escogieron 2 de las 6 muestras de agua, para lo cual se tuvo como referencia los rangos de las turbiedades con las que realmente se tratan en la planta de tratamiento de agua potable de La Atarjea. Durante los meses de verano se tiene una alta turbiedad que se encuentran en el rango de 200 a 600 UNT y durante el resto del año se tiene una baja turbiedad en el rango de 6 a 50 UNT.

Por lo que se optó por seleccionar las turbiedades de 50 y 200 UNT seleccionándose una muestra de agua que está en el rango de baja turbiedad y otra en el rango de alta turbiedad, emulándose de esta manera lo que sucede en dicha PTAP.



Con las 2 muestras de agua seleccionadas se procedió a analizar el alginato de sodio como ayudante de coagulación del sulfato de aluminio. Para lo cual se halló:

- Los parámetros óptimos del sulfato de aluminio sin ayudante de coagulación.
- Los parámetros óptimos del sulfato de aluminio con ayudante de coagulación.

### **9.2.2 PARÁMETROS ÓPTIMOS DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE**

Una vez comprobado que el alginato de sodio si remueve turbiedad y además habiendo seleccionado los dos tipos de muestras de agua, fue el sulfato de aluminio lo único que se dosificó al agua preparada para la reducción de la turbiedad, con la finalidad de hacer un análisis de cómo actúa sin la presencia de alginato de sodio como ayudante de coagulación.

En los ensayos aplicando solo sulfato de aluminio se determinó las siguientes variables óptimas:

- Dosis óptima del sulfato de aluminio.
- Concentración óptima del sulfato de aluminio.
- Tiempo óptimo de floculación del sulfato de aluminio.
- Gradiente de velocidad óptima de mezcla lenta del sulfato de aluminio.
- Velocidad óptima de sedimentación del sulfato de aluminio.

### **9.2.3 PARÁMETROS ÓPTIMOS DEL ALGINATO DE SODIO COMO AYUDANTE DE COAGULACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO**

En esta etapa se aplicó ambas soluciones: sulfato de aluminio como coagulante y el alginato de sodio como ayudante de coagulación.

En los ensayos aplicando el alginato de sodio como ayudante de coagulación del sulfato de aluminio se determinaron las siguientes variables óptimas:

- Dosis óptima del alginato de sodio.
- Concentración óptima del alginato de sodio.
- Tiempo óptimo de floculación del alginato de sodio.
- Gradiente de velocidad óptima de mezcla lenta del alginato de sodio.
- Velocidad óptima de sedimentación del Alginato de Sodio.

Una vez hallado todos los parámetros óptimos del alginato de sodio como ayudante de coagulación del sulfato de aluminio se procedió a comparar los resultados con los obtenidos empleando el sulfato de aluminio sin ayudante de coagulación.

Después se analizó si es viable técnica y económicamente la utilización del ayudante de coagulación del sulfato de aluminio.

### **9.3 OBTENCIÓN DEL ALGINATO DE SODIO EN POLVO:**

La obtención del alginato basada en el método desarrollado por Haung (1964), el cual fue modificado sucesivamente de acuerdo a la naturaleza de la materia prima y el uso pensado para el producto final.

#### **Etapa 1: Tratamiento primario:**

**Secado, molienda y tamizado**

**1.- Los ejemplares de *Macrocystis Pyrifera* fueron lavadas para eliminar la arena y demás residuos.**

2.- Secado de Alga: Se le dejó secar al aire libre por dos días, luego se le puso a secarlo en el horno a una temperatura de 60° C, ya que estas todavía se encontraban un poco húmedas.

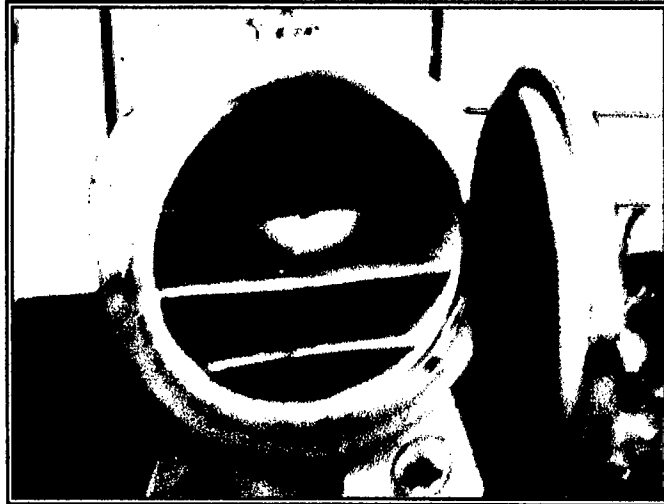


Figura 9.1 Secado del alga.

3.- Molienda de las algas: Una vez secada las algas pasaron por un proceso de trituración en un molino de cuchillas o molienda casera, hasta obtener las partícula más finas de las algas de tamaño inferior a 1cm de diámetro aparente, mientras más finas sean las partículas será más óptimo el proceso del tamizado.

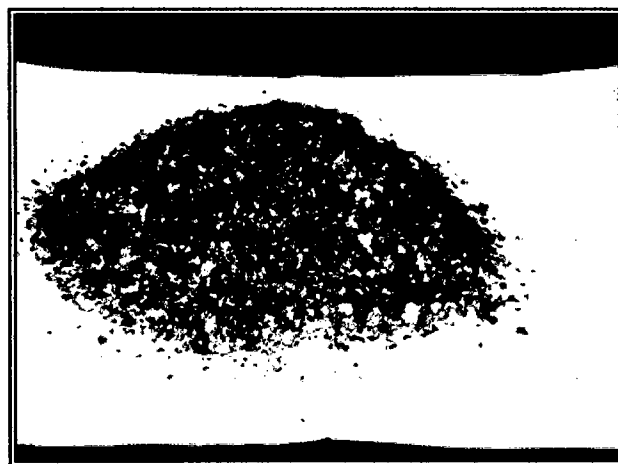


Figura 9.2 Resultado de la molienda de las algas.

4.-Tamizado: Luego se tamizaron en un tamiz vibratorio, se procedió a extraer la sal o arena sobrante que se encontraban junto a las algas.

En este punto se tiene al sólido disgregado y seco, en pequeñas partículas para la posterior separación de los alginatos.

#### Etapa 2: Extracción de alginato de sodio

Lixiviación, Maceración, Separación por centrifugación.

1.-Una vez extraída la sal que se encontraba junto a las partículas de las algas, se procedió a mezclarlo con 40 ml de alcohol etílico al 90%. Se utilizó una bagueta para poder realizar el mezclado.

2.- A la mezcla obtenida de las algas pardas y el alcohol etílico se le dejó reposar por un promedio de 15 horas, produciéndose una lixiviación.

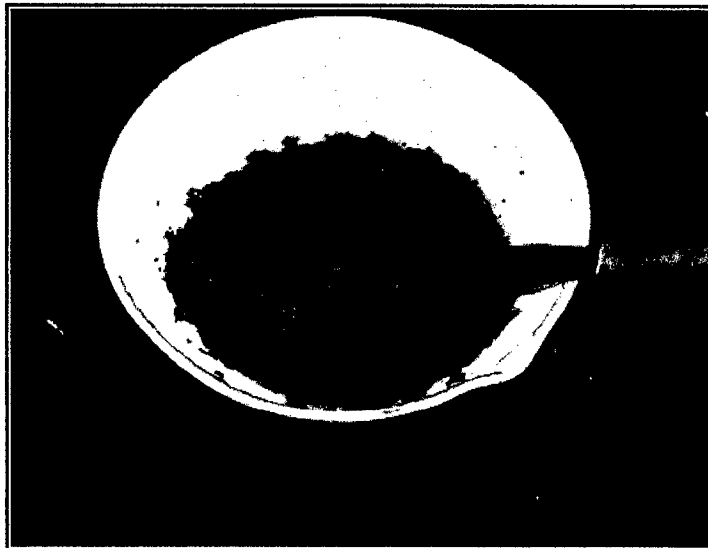


Figura 9.3 Mezcla de las algas pardas y el alcohol etílico en reposo.

3.- Una vez pasado el tiempo necesario se procedió a separar la parte sólida de la líquida, usando para ello una gasa que funciona como filtro.



Figura 9.4 Obtención del líquido mediante la filtración

4.- Luego de usar la gasa se obtuvo dos fases: una líquida de apariencia viscosa de color marrón oscuro y la otra fase un residuo sólido.

5.- A la solución resultante se le centrifugo, con la finalidad de separar las partículas sólidas en suspensión.

6.- Luego del proceso de centrifugado se procedió a agregar a la solución obtenida 35 ml de cloruro de calcio al 10% para poder formar el alginato de calcio.



Figura 9.5 Agregando cloruro de calcio a la solución obtenida

7.- A la solución líquida se le calentó en el horno por un tiempo de 10

minutos, a una temperatura de 60° C.

8.- Teniendo la solución ya calentada se le agregó 37 mg el carbón activado (pesado previamente) con la finalidad de realizar el blanqueado.

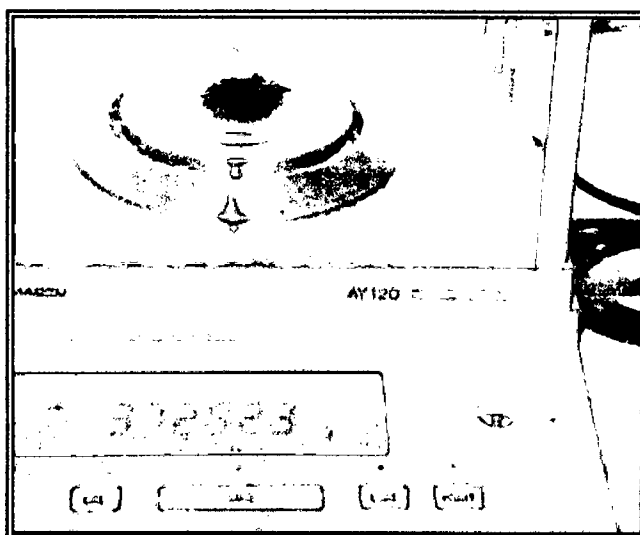


Figura 9.6 Pesando el carbón activado

**Etapas 3:** Obtención de alginato de Calcio, ácido algínico y alginato de sodio.

1.- La solución obtenida fue filtrada, usando para ello el papel filtro colocado en varios matracas para así agilizar el proceso de filtración.

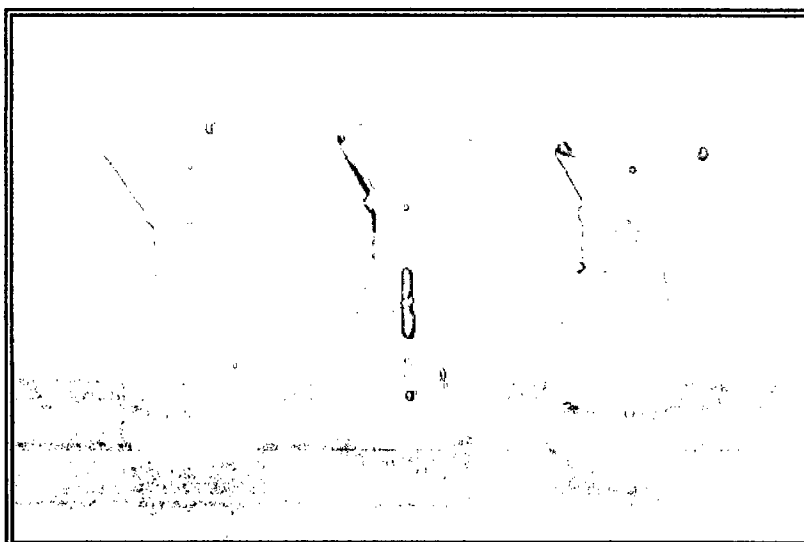


Figura 9.7 Filtración de la solución obtenida en los matracas

2.- La solución obtenida tenía un color más transparente a simple vista, a

comparación de la solución con el carbón activado.

3.- A la solución obtenida se le procedió a agregar 10 ml de ácido clorhídrico de 0.1N para así formar el ácido algínico, observándose la formación de una espuma en su superficie como resultado de la reacción.

4.- Se le agregó el ácido clorhídrico hasta que su pH disminuya hasta 2.

5.- Se centrifugó la muestra por un tiempo de 10 minutos para posteriormente realizar un lavado con 20 ml de alcohol etílico al 90 %, y finalmente un secado a 40°C.

6.- Por último se agregó el carbonato de sodio al 4% hasta obtener un pH neutro (PH=7), para así convertir el ácido algínico en alginato de sodio que era el producto que deseábamos obtener como resultado final.

Para la obtención del alginato de sodio se realizaron todos los pasos descritos anteriormente, pero el producto que se obtuvo no fue el suficiente para lo que se necesitaba en los ensayos de laboratorio y el tiempo empleado en realizar todos los procedimientos fue muy largo. Haciendo una evaluación fue más conveniente comprar el producto ya elaborado para realizar nuestros análisis posteriores.

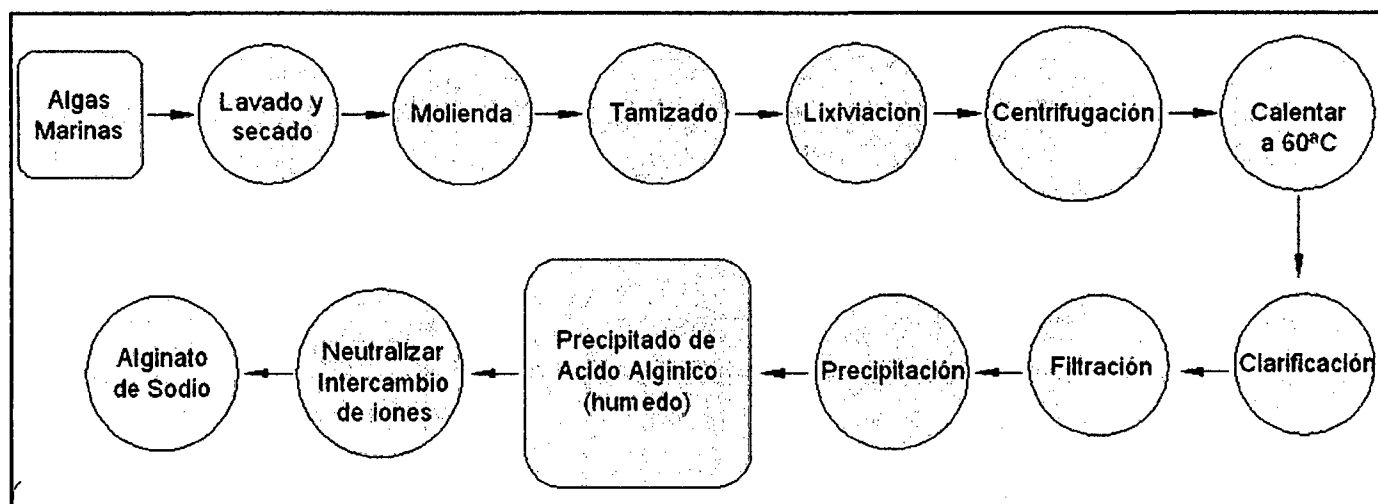


Figura 9.8 Pasos para la elaboración del alginato de sodio

#### 9.4 OBTENCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE ALGINATO DE SODIO:

##### 9.4.1 EQUIPOS:

- Agitador magnético.
- Balanza electrónica.

##### 9.4.2 MATERIALES:

- Espátula.
- Luna de reloj.
- Vaso de precipitado de 250 ml.

##### 9.4.3 REACTIVOS O SUSTANCIAS A EMPLEAR:

- Alginato de sodio en polvo.
- Agua destilada.

##### 9.4.4 PROCEDIMIENTO:

Una vez obtenido el alginato de sodio en polvo, para obtener la solución de alginato de sodio con la concentración deseada, se tuvo que:

- Primeramente se pesó la cantidad de alginato de sodio en polvo en la balanza electrónica (ver figura 9.9) el cual depende de la concentración que se quiera obtener.

Se sabe que:

$\%C = \frac{W}{V} * 100\% \Rightarrow$  El peso se calculará con:

$$W = \%C * V$$

Donde:

W= Peso del alginato de sodio en polvo (gr.)

C= Concentración de la solución del ayudante de coagulación

(10 000mg/l <> 10g/l <> 1%)



V= volumen de agua destilada, sería el volumen de la fiola de 100ml.

El disolvente que se utilizó fue el agua destilada que tiene pH=7

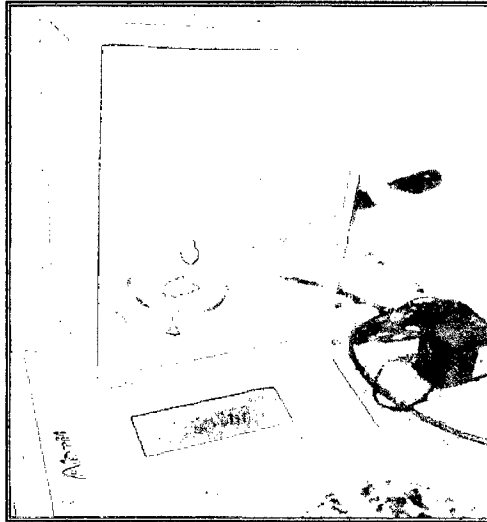


Figura 9.9 Pesado de alginato de sodio

- En el agua destilada agitada a alta velocidad mediante un equipo agitador magnético (ver figura 9.10) se le agregó alginato de sodio en polvo de forma gradual es decir en pequeñas cantidades poco a poco para evitar producir grumos como los que se forman con la harina logrando así una mezcla homogénea.

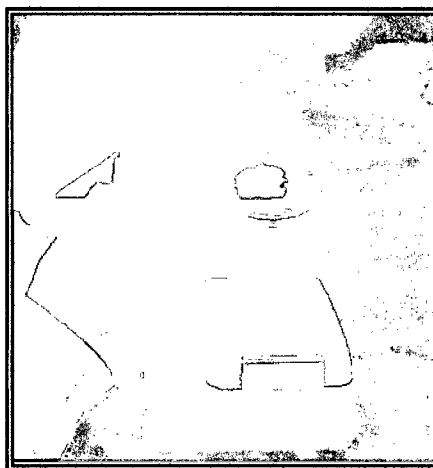


Figura 9.10 Agregando alginato de sodio en polvo de forma gradual.

- Una vez que se añadió todo el grano de alginato de sodio se tapó el vaso precipitado con una luna de reloj y se hizo girar la solución durante un tiempo

de 5 minutos para que se homogenice la misma.

- Luego que se homogenizó la solución se vació el contenido en una fiola de 100 ml. Y se completó con agua destilada hasta obtener los 100 ml.

#### **9.4.5 SUGERENCIAS:**

- El agua destilada que va en el vaso de precipitado solo debe enrasar el agitador magnético ya que si se coloca más agua en el vaso precipitado la preparación de la solución no será uniforme obteniéndose una solución en dos fases y lo que se quiere lograr es una solución de alginato de sodio homogénea.

- Añadir el alginato de sodio de manera gradual para evitar formar grumos.

- No es necesario calentar el agua destilada todo se hace a temperatura ambiente.

#### **9.5 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA DE AGUA CRUDA:**

Las muestras fueron preparadas en el laboratorio. El agua que se empleó para la preparación de las muestras fue agua potable del laboratorio de La Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Para la preparación de la muestra con la turbiedad artificial deseada se desarrollo de la siguiente manera:

- Se utilizó tierra de jardín y se echó en un recipiente, utilizando un colador para obtener partículas finas o coloides (arcillas, limo, tierra finamente dividida, etc.). eliminando cualquier material solido no deseado.

- Una vez que obtuvo la muestra se agregó agua potable, se mezcló hasta obtener una mezcla uniforme y posteriormente se eliminó todo el material flotante (material orgánico, desperdicios, etc.). (Ver figura 9.11)

- Se agitó nuevamente por un tiempo de 20 minutos con la finalidad de homogenizar la mezcla.

- Luego se dejó reposar la mezcla por un espacio de una hora, con la finalidad que sedimenten las partículas más pesadas que la arcilla, limo y tierra finamente dividida, etc.

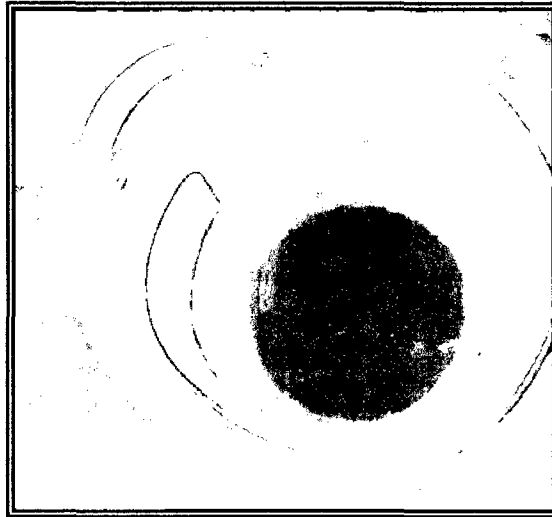


Figura 9.11 Mezclado de la tierra de jardín con agua.

- Una vez que sedimentó las partículas deseadas se llevó todo el sobrenadante a otro recipiente y lo que sedimentó se eliminó.
- Se volvió a agitar la mezcla que se llevó a otro recipiente y se dejó sedimentar por un espacio de una hora luego medimos la turbiedad del nuevo sobrenadante.
- Cuando la turbiedad obtenida es muy alta de la que deseamos entonces en otros recipientes se diluyó el sobrenadante con agua potable hasta obtener la turbiedad deseada, en caso contrario si la turbiedad obtenida fue menor que la deseada se tuvo que añadir al sobrenadante otra vez una cantidad de la

mezcla de tierra con agua para así poder aumentar la turbiedad.

- Las turbiedades obtenidas para realizar los primeros ensayos (dosis óptima del alginato de sodio) son: 50, 100, 150, 200, 300, 400 UNT.

## **9.6 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA, CONCENTRACIÓN ÓPTIMA, PARÁMETROS DE FLOCULACIÓN, VELOCIDAD ÓPTIMA DE SEDIMENTACIÓN:**

### **9.6.1 EQUIPOS:**

- 1 bureta.
- 1 matraz erlenmeyer.
- 1 fiola de 100 ml.(para el reactivo principal)
- 1 pipeta graduada de 10 ml.
- 1 pipeta graduada de 1ml.
- 6 vasos de precipitados de 50 ml.
- 6 vasos de precipitados de 2L.
- 6 deflectores.
- 6 jeringas hipodérmicas de 10ml.
- 6 tomadores de muestra provistos de manguera flexible, un flotador de poroflex o similar y un tubo de vidrio.

### **9.6.2 MATERIALES:**

- Equipo de prueba de jarras.
- Turbidímetro Nefelométrico.
- Agitador magnético.
- Cronómetro.
- Peachímetro.

**9.6.3 REACTIVOS O SUSTANCIAS A EMPLEAR:**

- Coagulante : Sulfato de aluminio
- Ayudante de coagulación : Alginato de sodio

**9.6.4 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DEL COAGULANTE:**

- Se determinó la calidad del agua cruda: Temperatura, turbiedad, pH, alcalinidad, dureza total.
- Se llenó todas las jarras con 2000 ml del agua cruda.
- Se seleccionó un rango de dosis de coagulante o ayudante de coagulación a aplicar, por lo que se tuvo que calcular el volumen correspondiente a cada dosis escogida.

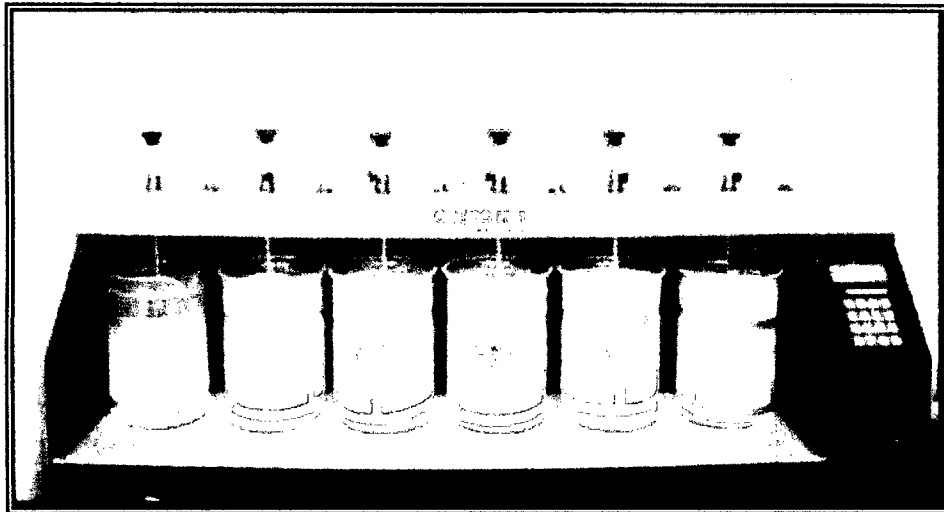


Figura 9.12 Jarras con 2000 ml. del agua cruda

d) Estos volúmenes se calcularon haciendo un balance de masa:

$$P = D * V = C * v$$

$$v = \frac{D * V}{C}$$

Donde:

P = Peso del coagulante o ayudante de coagulación.

v = Volumen de la solución por aplicar (ml).

D = Dosis del coagulante o ayudante de coagulación (mg/l).

C = Concentración del coagulante o del ayudante de coagulación

(10 000mg/l <> 10g/l <> 1%)

V = Volumen de la jarra (2000 ml).

e) Con los volúmenes ya conocidos por medio de una pipeta se colocaron en los 6 vasos de precipitados de 50ml



Figura 9.13 Succión de la solución de la fiola de 100ml.

f) Se succionó el contenido de cada vaso con una jeringa hipodérmica y luego retire las agujas de ellas, teniendo cuidado en perder el contenido.

g) Se colocó la jeringa delante de la jarra correspondiente.

h) Se puso en funcionamiento el equipo de prueba de jarras programando las memorias de la siguiente manera:

Memoria 1 = T: 5 segundos, V: 300 rpm. (Mezcla rápida)

Memoria 2 = T: 20 minutos, V: 40 rpm. (Proceso de floculación)

Memoria 3 = T: 10 minutos, V: 0 rpm. (Proceso de sedimentación)

Si en el ábaco de la figura 8.8 entramos a las curvas que corresponden a una prueba con estatores con una velocidad de 300 rpm y temperatura promedio de 20°C, podemos comprobar que en estas condiciones se consigue un gradiente de velocidad de aproximadamente 770 s<sup>-1</sup>. Asimismo, durante la etapa de floculación con 40 rpm se estará aplicando un gradiente de velocidad de 52 s<sup>-1</sup> que corresponde a un gradiente de floculación promedio.

i) Se inició el funcionamiento del equipo, aplicando en forma simultánea e instantánea el coagulante o ayudante de coagulación a todas las jarras. Cuidando que la solución penetre profundamente para que la dispersión sea más rápida.



Figura 9.14 Añadir el coagulante y el ayudante de coagulación en los primeros 5 segundos (mezcla rápida a 300 rpm).

j) Luego que ocurrió la mezcla rápida la velocidad de rotación de las paletas se disminuyó a 40 rpm dando inicio al proceso de floculación por un tiempo de 20 minutos. (El equipo ya está programado)

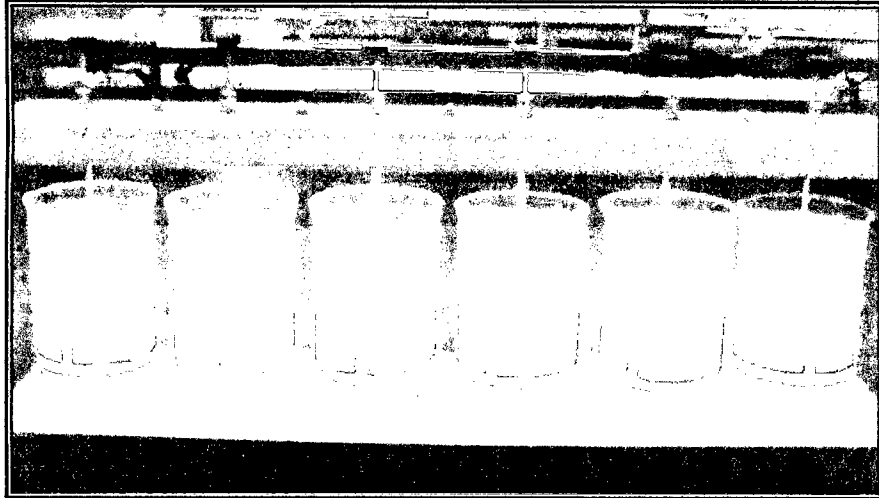


Figura 9.15 Proceso de Sedimentación de floculación

k) Una vez que el equipo ha concluido con los tiempos de mezcla y floculación, se apagó automáticamente y se procedió a retirar las jarras, se colocó los tomadores de muestras, utilizando una jeringa se puso al extremo del sifón y se succionó un poco de agua de la jarra, se atracó el extremo del sifón utilizando una liga (colocada alrededor de la jarra), y se dejó sedimentar el agua por 10 minutos.

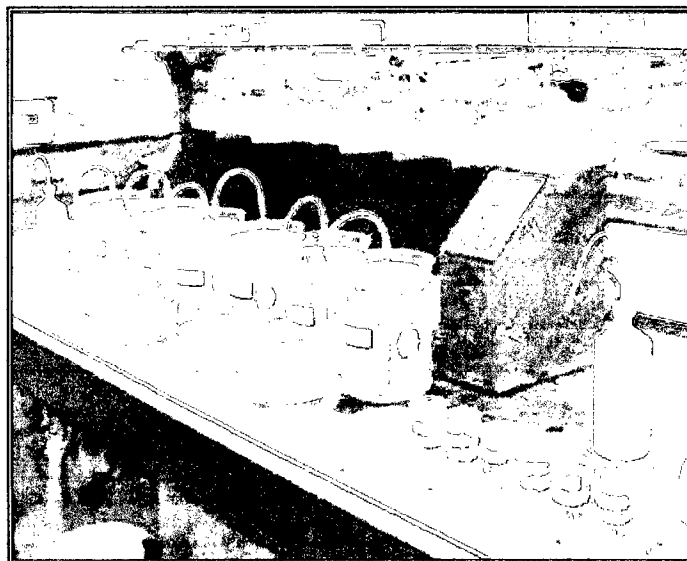


Figura 9.16 Proceso de Sedimentación



l) Cumplido el tiempo de sedimentación, se descartó los primeros 10 ml de muestra retenidos en el sifón y se tomó muestras de todas las jarras un volumen aproximado de 30 ml.



Figura 9.17 Toma de muestra para determinar la turbiedad

m) Se midió la turbiedad de cada muestra (la que contiene los vasos de precipitado de 50ml.).

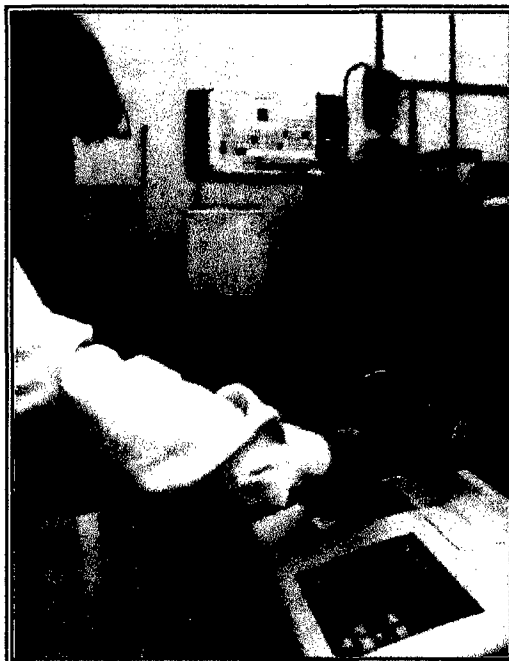


Figura 9.18 Medición de la turbiedad

n) Se graficó los resultados, seleccionándose como dosis óptima, aquella que produce la mayor remoción de turbiedad.

#### 9.6.5 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA UTILIZANDO EL COAGULANTE Y EL AYUDANTE DE COAGULACIÓN

- a) Se repitió los pasos: a, b del ítem título 9.6.4
- b) Se seleccionó un rango de dosis de ayudante de coagulación a aplicar, por lo que se tuvo que calcular el volumen correspondiente a cada dosis escogida según el paso "d" del ítem título 9.6.4
- c) Con los volúmenes ya conocidos por medio de una pipeta se colocaron en los 6 vasos de precipitado de 50ml.
- d) Se succionó el contenido de cada vaso con una jeringa hipodérmica y luego se retiró las agujas de ellas.
- e) Sabiendo la dosis óptima de coagulante hallada en el ítem título 9.6.4 se colocó con la ayuda de una pipeta la mitad de dicha dosis en 6 vasos de precipitado, posteriormente se succionó el contenido de cada vaso con una jeringa hipodérmica y luego se retiró las agujas de ellas.
- f) Se colocó las jeringas delante de las jarras correspondientes es decir cada jarra tendrá su jeringa con su respectivo coagulante y ayudante de coagulación.

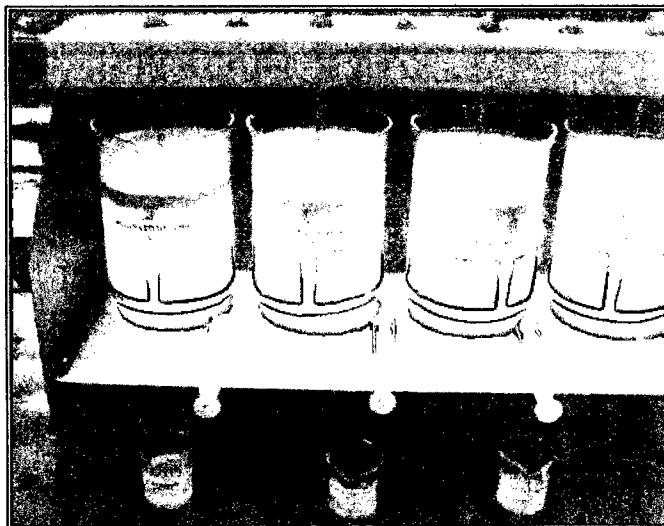


Figura 9.19 Colocación del sulfato de aluminio y alginato de sodio

para su aplicación.

g) Se puso en funcionamiento el equipo de prueba de jarras programando las memorias de la siguiente manera:

Memoria 1 = T: 5 segundos, V: 300 rpm. (Mezcla rápida)

Memoria 2 = T: 20 minutos, V: 40 rpm. (Proceso de Floculación)

Memoria 3 = T: 10 minutos, V: 0 rpm. (Proceso de Sedimentación)

Se inició el funcionamiento del equipo, aplicando en forma simultánea el coagulante y luego el ayudante de coagulación a todas las jarras todo, esto durante los 5 primeros segundos. Cuidando que la solución penetre profundamente para que la dispersión sea más rápida.

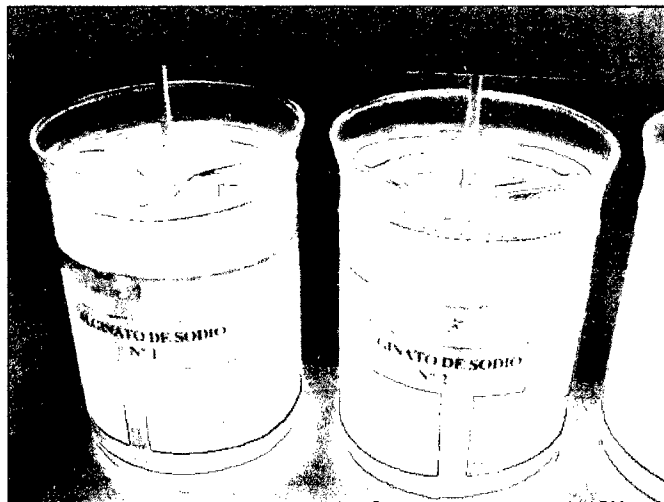


Figura 9.20 Jarras de 2000 ml. mostrando la formación de flóculos

- h) Se repitió los pasos: k, l, m, n del ítem título 9.6.4
- i) Una vez que se determinó la dosis óptima del alginato de sodio como ayudante de coagulación se realizó otra prueba de jarras pero manteniendo constante la dosis óptima del alginato de sodio, variando solo la dosis del coagulante.
- j) Se graficó los resultados de esta última prueba de jarras seleccionándose la menor turbiedad que es la que nos indicó la dosis óptima del coagulante y del ayudante de coagulación.

#### **9.6.6 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ÓPTIMA UTILIZANDO SOLO EL COAGULANTE O EL AYUDANTE DE COAGULACIÓN**

- a) Se llenó todas las jarras con 2000 ml del agua cruda.
- b) Con la dosis óptima de la solución del sulfato de aluminio (coagulante) o del alginato de sodio (ayudante de coagulación), hallada en la prueba del ítem título 9.6.4 se seleccionó un rango de concentración a aplicar, colocando los volúmenes de solución que se van a agregar en los 6 vasos de precipitado de 50 ml.

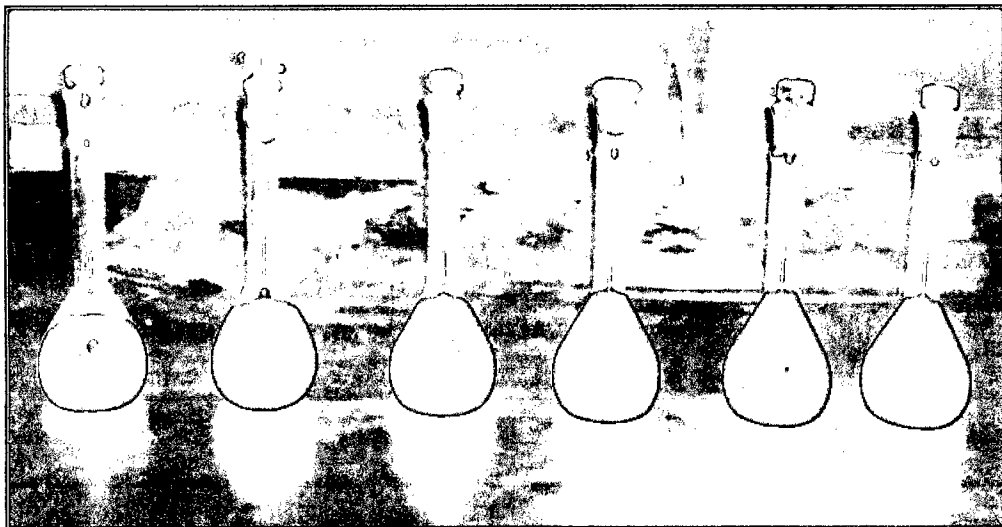


Figura 9.21 Fiolas con diferentes concentraciones de alginato de sodio

- c) Se llenó las jeringas de acuerdo al procedimiento de dosis óptima, pero

colocando en todas la misma dosis óptima ya determinada, con las diferentes concentraciones de solución preparadas.

d) Se efectuó la mezcla rápida, la floculación y la decantación de acuerdo con lo indicado en la prueba anterior programando la memoria del equipo (paso "H" del ítem título 9.6.4).

e) Se repitió los pasos: i, j, j, k, l, m del ítem título 9.6.4

f) Se graficó los resultados obtenidos, seleccionándose como concentración óptima, aquella que produce la mayor remoción de turbiedad.

#### **9.6.7 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ÓPTIMA UTILIZANDO EL COAGULANTE Y EL AYUDANTE DE COAGULACIÓN:**

a) Se llenó todas las jarras con 2000 ml del agua cruda.

b) Con la concentración óptima de la solución de coagulante hallada de la prueba del ítem título 9.6.6, se procedió a hallar la concentración óptima del ayudante de coagulación manteniendo constante la concentración óptima de coagulante (1%) y haciendo variar la concentración del ayudante de coagulación. Se agregó dichos volúmenes respectivos de cada solución a los vasos de precipitado de 50 ml.

c) Se succionó el contenido de cada vaso con una jeringa hipodérmica y luego se retiró las agujas de ellas.

d) Se colocó la jeringa delante de la jarra correspondiente.

e) Se efectuó la mezcla rápida, la floculación y la decantación de acuerdo con lo indicado en la prueba anterior programando la memoria del equipo (paso "H" del ítem título 9.6.4).

f) Se repitió los pasos: i, j, j, k, l, m del ítem título 9.6.4

g) Se graficó los resultados obtenidos, y se escogió como concentración óptima, aquella que produce la mayor remoción de turbiedad.

### 9.6.8 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FLOCULACIÓN:

- a) Se determinó la calidad del agua cruda: Temperatura, color, turbiedad, pH, alcalinidad, dureza total.
- b) Se llenó las 6 jarras con una muestra del agua cruda que se va a flocular.
- c) Se programó el equipo para la mezcla rápida, floculación y sedimentación como lo visto en las pruebas anteriores:

Memoria 1 = T: 5 segundos, V: 300 rpm. (Mezcla rápida)

Memoria 2 = T: 30 minutos, la velocidad ira variando en cada prueba de jarras hasta escoger la óptima (Proceso de Floculación)

Memoria 3 = T: 10 minutos, V: 0 rpm. (Proceso de Sedimentación)

El rango de las gradientes de velocidad óptimas para esta prueba fluctúa entre  $80$  y  $20 \text{ s}^{-1}$ . Cuando el estudio corresponda a una planta de gran capacidad, se tomarán intervalos de  $10 \text{ s}^{-1}$ ; cuando se trate de una planta pequeña, se tomarán intervalos de  $20 \text{ s}^{-1}$ .

- d) Luego de iniciada la floculación, a los 5 minutos se retiró la primera jarra, se colocó el tomador de muestras y se dejó sedimentar durante 10 minutos. Después de 10 minutos, se retiró la segunda; luego de 15, la tercera; y así sucesivamente, hasta que a los 30 minutos se retiró la última jarra. Con cada jarra se procede de modo similar.

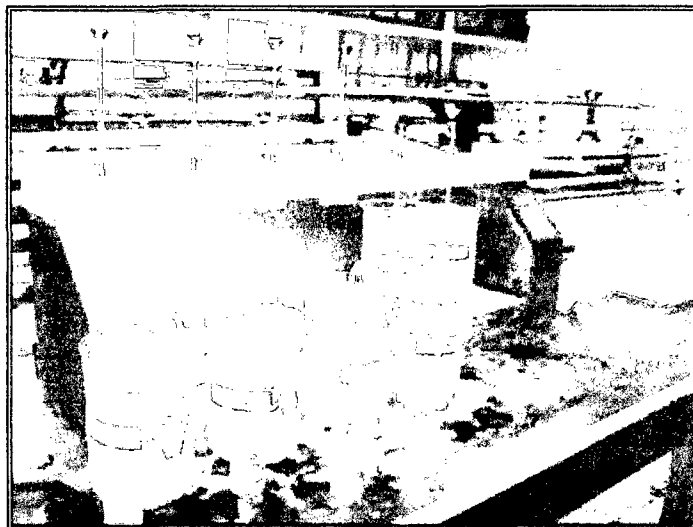


Figura 9.22 Proceso de floculación

- e) Se determinó la turbiedad residual ( $T_f$ ) a cada muestra, se calculó la eficiencia remocional ( $T_f/T_o$ ).
- f) Se repitió el ensayo incrementando el gradiente de velocidad de acuerdo con el intervalo seleccionado.
- g) Se repitió el procedimiento con cada una de las condiciones de turbiedad, representativas de la calidad de agua cruda existente.
- h) Se graficó en escalas aritméticas la eficiencia remocional ( $T_f/T_o$ ) versus los tiempos de floculación de cada una de las jarras de las que proceden las muestras analizadas. En este gráfico se determinó el tiempo total de floculación, en función del punto en que se produce el menor valor de ( $T_f/T_o$ ).
- i) Posteriormente, se graficó los valores de  $T_f/T_o$  versus gradientes de velocidad, para cada tiempo de floculación analizado. En cada curva de tiempo se produce un punto mínimo (punto de inflexión de la parábola), que corresponde al gradiente de velocidad que optimiza con ese tiempo de retención. Este punto mínimo es el de máxima eficiencia remocional para el tiempo de retención correspondiente. En cada curva de tiempo se identifica el punto mínimo tomando el gradiente de velocidad óptimo correspondiente.
- j) Se graficó en papel doble logarítmico los valores de tiempo versus gradientes de velocidad óptimas. Se determinó la línea de mejor ajuste de estos puntos aplicando mínimos cuadrados y se determinó la ecuación de correlación y el grado de ajuste. Si el grado de ajuste es aceptable ( $r^2 = 0,90$ ), se continúa el cálculo; en caso contrario, deberá repetirse el procedimiento de laboratorio, y se deberá trabajar con más cuidado para mejorar los datos.
- k) El tiempo de retención determinado en el primer gráfico se dividió para el número de tramos que tiene el floculador (en el caso de que estemos evaluando una unidad) o bien para el número de tramos que hemos seleccionado en la unidad que estamos proyectando y con cada tiempo se entró al gráfico y se determinó la gradiente de velocidad correspondiente.

### 9.6.9 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DECANTACIÓN:

a) Se llenó las seis jarras del equipo con la muestra de agua en estudio.

b) Se programó el equipo para la mezcla rápida y floculación:

Memoria 1 = T: 5 segundos, V: 300 rpm. (Mezcla rápida)

Memoria 2 = T:  $t_1$  minutos, V:  $v_1$  rpm (Proceso de Floculación), donde  $t_1$ ,  $v_1$ , se obtienen de la prueba de floculación del ítem 9.6.8.

Memoria 3 = T:  $t_2$  minutos, V:  $v_2$  rpm (Proceso de Floculación), donde  $t_2$ ,  $v_2$ , se obtienen de la prueba de floculación del ítem 9.6.8.

Memoria 4 = T:  $t_3$  minutos, V:  $v_3$  rpm (Proceso de Floculación), donde  $t_3$ ,  $v_3$ , se obtienen de la prueba de floculación del ítem 9.6.8.

c) Se encendió el equipo y se agregó la dosis óptima, realizando la mezcla rápida de acuerdo con lo indicado anteriormente.

d) A cada jarra se le tomó una muestra a un tiempo diferente. La primera, al minuto; la segunda, a los 2 minutos; la tercera, a los 4; la cuarta, a los 5; y la sexta, a los 10 minutos.

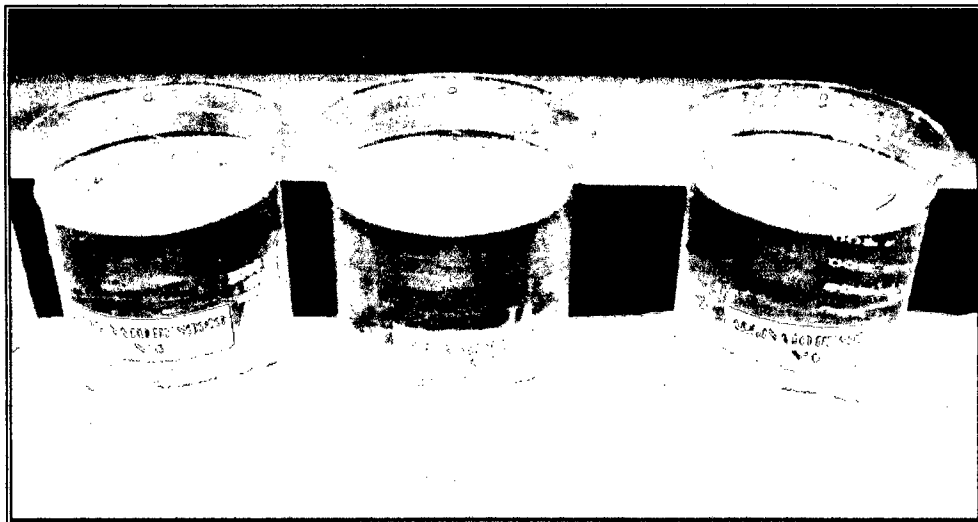


Figura 9.23 Toma de muestras para la decantación



- e) Se determinó la turbiedad residual.
- f) Después de media hora, se trasegó el sobrenadante de una de las jarras, se colocó el lodo en una probeta, se midió el volumen formado y se determinó los mililitros de lodos producidos por cada litro de agua tratada.

Figura 9.24 Jarras de 2000 ml mostrando lo sedimentado



- g) Se calculan los valores de  $(h/T)$  para cada tiempo de toma de muestra. Este valor corresponde a  $(V_s)$ , la velocidad de decantación en  $(\text{cm/s})$ . El valor de  $(h)$  es la altura de toma de muestra graduada en el sifón  $(6\text{cm})$ .
- h) Con los valores de  $(V_s)$  en  $\text{cm/s}$  en las abscisas y los valores de  $(C_o = T_f/T_o)$  en las ordenadas, se obtiene la curva de decantación para el agua estudiada.
- i) Con los valores de  $(V_s)$  en  $\text{cm/s}$  del cuadro, se entró a la curva de decantación obtenida en el ensayo y determinar los valores correspondientes de  $(C_o = T_f/T_o)$ ,
- j) Se tomó de la curva los valores de  $(C_f)$  y  $(a)$ .  $(C_f)$  es la porción de turbiedad que no se removió en el proceso. La curva tiene una porción inicial (lado izquierdo de la curva), en que se vuelve asintótica; no importa cuán largo sea el tiempo de decantación que demos a la muestra, la turbiedad residual es la misma. Esta es la porción de turbiedad que solo puede ser removida por el filtro. El valor de "a" corresponde a esta velocidad a partir de la cual la curva

comienza a hacerse asintótica. Esta velocidad "a" es la menor velocidad con que se justificaría proyectar un decantador para esa agua, porque aunque tomáramos valores menores, la remoción será la misma y estaríamos agrandando la unidad sin conseguir mayor eficiencia.

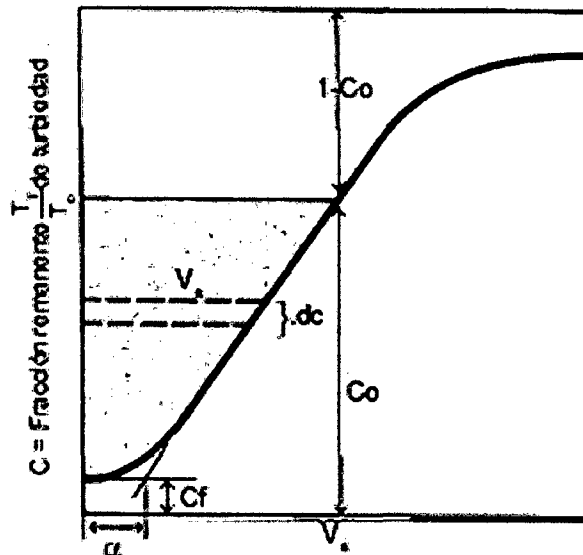


Figura 9.25 Curva de variación de eficiencia en función de la velocidad de decantación.

k) se calculó el porcentaje total de remoción (Rt), la turbiedad removida (Tr) y la turbiedad final o remanente (Tf).

$$Rt = [1 - (Co - Cf)] + [(a + Vs) / 2 Vs] (Co - Cf)$$

$$Tr = Rt \times To$$

$$Tf = To - Tr$$

l) La carga superficial del decantador será aquella que corresponda al valor de turbiedad final (Tf) deseado en el efluente de la unidad.

Lo que se busca es una de calidad eficiente para el efluente debe ser no mayor de 2,0 UNT, por lo que se procedió a identificar con que tasa de decantación se obtendría un efluente de esta calidad.

## CAPITULO 10. RESULTADOS DE LABORATORIO

### 10.1 RESULTADO DE LA DOSIS ÓPTIMA DEL ALGINATO DE SODIO PARA DIFERENTES TURBIEDADES.

En este presente ítem se mostrará los resultados obtenidos sobre la dosis óptima para diferentes muestras de agua con turbiedades artificiales de: 50, 100, 150, 200, 300, 400 UNT, para tener una idea si el alginato de sodio puede ser empleado en el proceso de la coagulación.

En el cuadro 15, se muestra el resumen de los resultados obtenidos para las diferentes turbiedades.

#### 10.1.1 RESULTADO DE LA DOSIS ÓPTIMA DEL ALGINATO DE SODIO PARA TURBIEDAD DE 50 UNT

<u>Características del agua</u>		<u>Reactivo</u>
Turbiedad inicial	= 50 UNT	Alginato de sodio
PH	= 7,932	Concentración = 1 %
Temperatura	= 18,1 °C	
Alcalinidad total	= 101 mg/l CaCO <sub>3</sub>	
Dureza total	= 292 mg/l CaCO <sub>3</sub>	

<u>Mezcla rápida</u>		<u>Mezcla lenta</u>	<u>Decantación</u>		
V	= 300 RPM	V	= 40 RPM	T	= 10 min.
T	= 5 seg.	T	= 20 min.	h	= 6 cm.
G	= 770 s <sup>-1</sup>	G	= 52 s <sup>-1</sup>		

Cuadro 8 Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad inicial de 50 UNT

Jarra	Dosis Alginato (mg/l)	Volumen Alginato (ml)	Turbiedad Final (UNT)
1	30	6	15,1
2	35	7	13,9
3	40	8	11,8
4	45	9	9,1
5	50	10	11,2
6	55	11	12,0

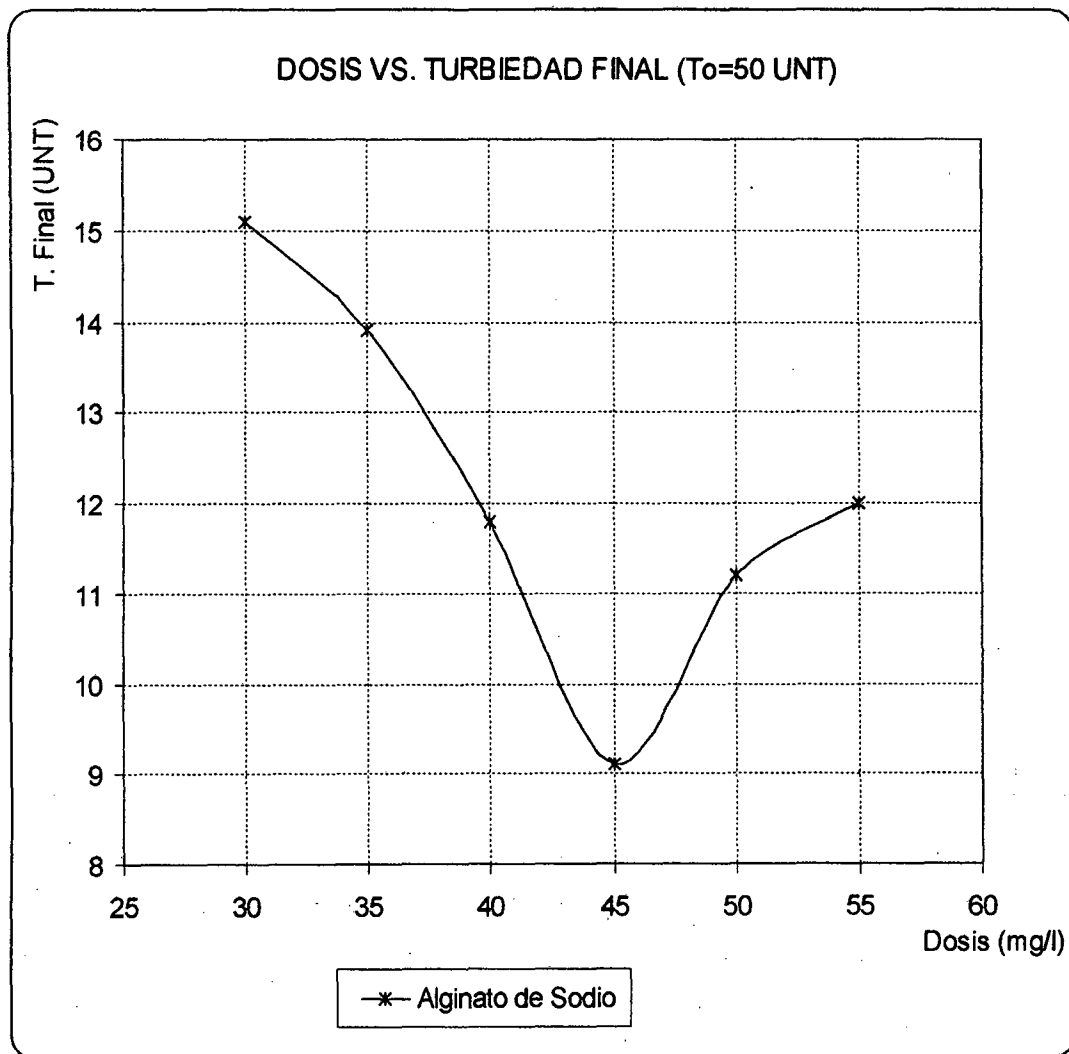


Figura 10.1 Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad inicial

50 UNT

### 10.1.2 RESULTADO DE LA DOSIS ÓPTIMA DEL ALGINATO DE SODIO PARA TURBIEDAD DE 100 UNT

<u>Características del agua</u>		<u>Reactivo</u>	
Turbiedad inicial	= 100 UNT	Alginato de sodio	
PH	= 7,942	Concentración	= 1 %
Temperatura	= 18,1 °C		
Alcalinidad total	= 101 mg/l CaCO <sub>3</sub>		
Dureza total	= 292 mg/l CaCO <sub>3</sub>		

<u>Mezcla rápida</u>		<u>Mezcla lenta</u>		<u>Decantación</u>	
V	= 300 RPM	V	= 40 RPM	T	= 10 min.
T	= 5 seg.	T	= 20 min.	h	= 6 cm.
G	= 770 s <sup>-1</sup>	G	= 52 s <sup>-1</sup>		

Cuadro 9 Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad de 100 UNT

Jarra	Dosis alginato (mg/l)	Volumen alginato (ml)	Turbiedad final (UNT)
1	35	7	40,7
2	40	8	36,6
3	45	9	31,2
4	50	10	29,1
5	55	11	31,2
6	60	12	33,0

Por lo tanto:

Turbiedad inicial = 100 UNT  
Dosis óptima = 50 mg/l  
Turbiedad final = 29,1 UNT

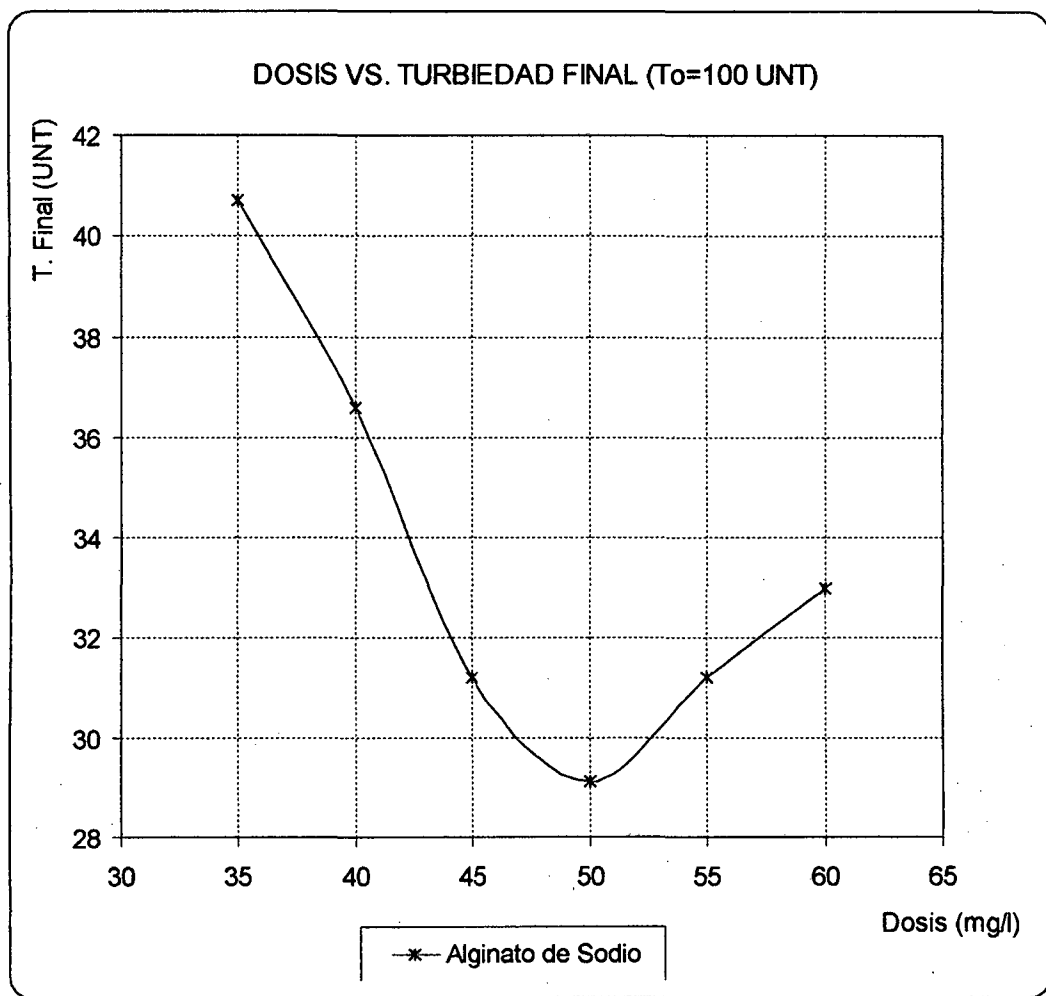


Figura 10.2 Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad inicial 100 UNT

### 10.1.3 RESULTADO DE LA DOSIS ÓPTIMA DEL ALGINATO DE SODIO PARA TURBIEDAD DE 150 UNT

<u>Características del agua</u>		<u>Reactivo</u>
Turbiedad inicial	= 150 UNT	Alginato de sodio
PH	= 7,95	Concentración = 1 %
Temperatura	= 18,1 °C	
Alcalinidad total	= 101 mg/l CaCO <sub>3</sub>	
Dureza total	= 292 mg/l CaCO <sub>3</sub>	

<u>Mezcla rápida</u>	<u>Mezcla lenta</u>	<u>Decantación</u>
V = 300 RPM	V = 40 RPM	T = 10 min.
T = 5 seg.	T = 20 min.	h = 6 cm.
G = 770 s <sup>-1</sup>	G = 52 s <sup>-1</sup>	

Cuadro 10 Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad de 150 UNT

Jarra	Dosis alginato (mg/l)	Volumen alginato (ml)	Turbiedad final (UNT)
1	30	6	37,6
2	40	8	32,3
3	50	10	29,7
4	60	12	28,5
5	70	14	30,3
6	80	16	31,8

Por lo tanto:

Turbiedad inicial = 150 UNT

Dosis óptima = 60 mg/l

Turbiedad final = 28,5 UNT

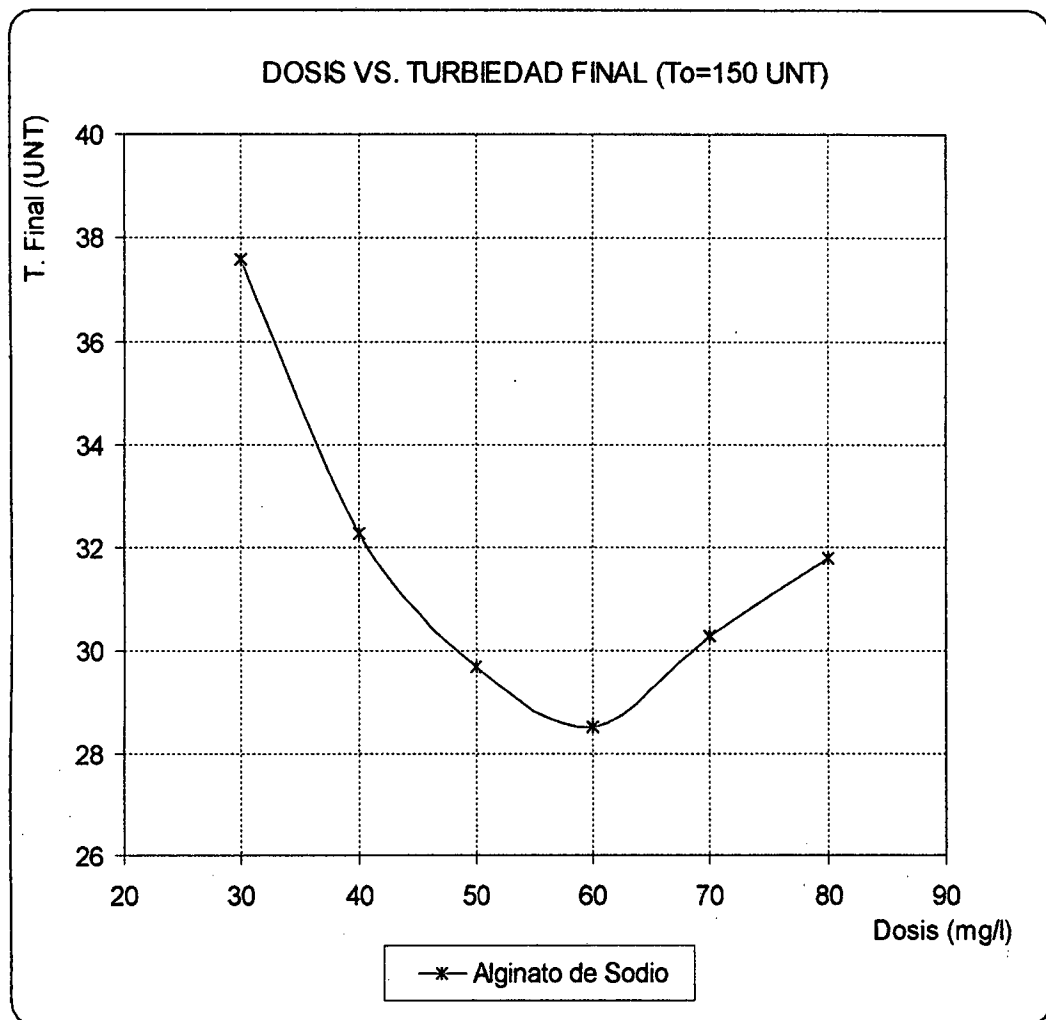


Figura 10.3 Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad inicial 150 UNT



### 10.1.4 RESULTADO DE LA DOSIS ÓPTIMA DEL ALGINATO DE SODIO PARA TURBIEDAD DE 200 UNT

<u>Características del agua</u>		<u>Reactivo</u>
Turbiedad inicial	= 200 UNT	Alginato de sodio
PH	= 7,958	Concentración = 1 %
Temperatura	= 18,1 °C	
Alcalinidad total	= 101 mg/l CaCO <sub>3</sub>	
Dureza total	= 292 mg/l CaCO <sub>3</sub>	

<u>Mezcla rápida</u>	<u>Mezcla lenta</u>	<u>Decantación</u>
V = 300 RPM	V = 40 RPM	T = 10 min.
T = 5 seg.	T = 20 min.	h = 6 cm.
G = 770 s <sup>-1</sup>	G = 52 s <sup>-1</sup>	

Cuadro 11 Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad de 200 UNT

Jarra	Dosis alginato (mg/l)	Volumen alginato (ml)	Turbiedad final (UNT)
1	50	10	44,8
2	55	11	41,4
3	60	12	38,7
4	65	13	35,7
5	70	14	37,8
6	75	15	39,2

Por lo tanto:

Turbiedad inicial = 200 UNT

Dosis óptima = 65 mg/l

Turbiedad final = 35,7 UNT

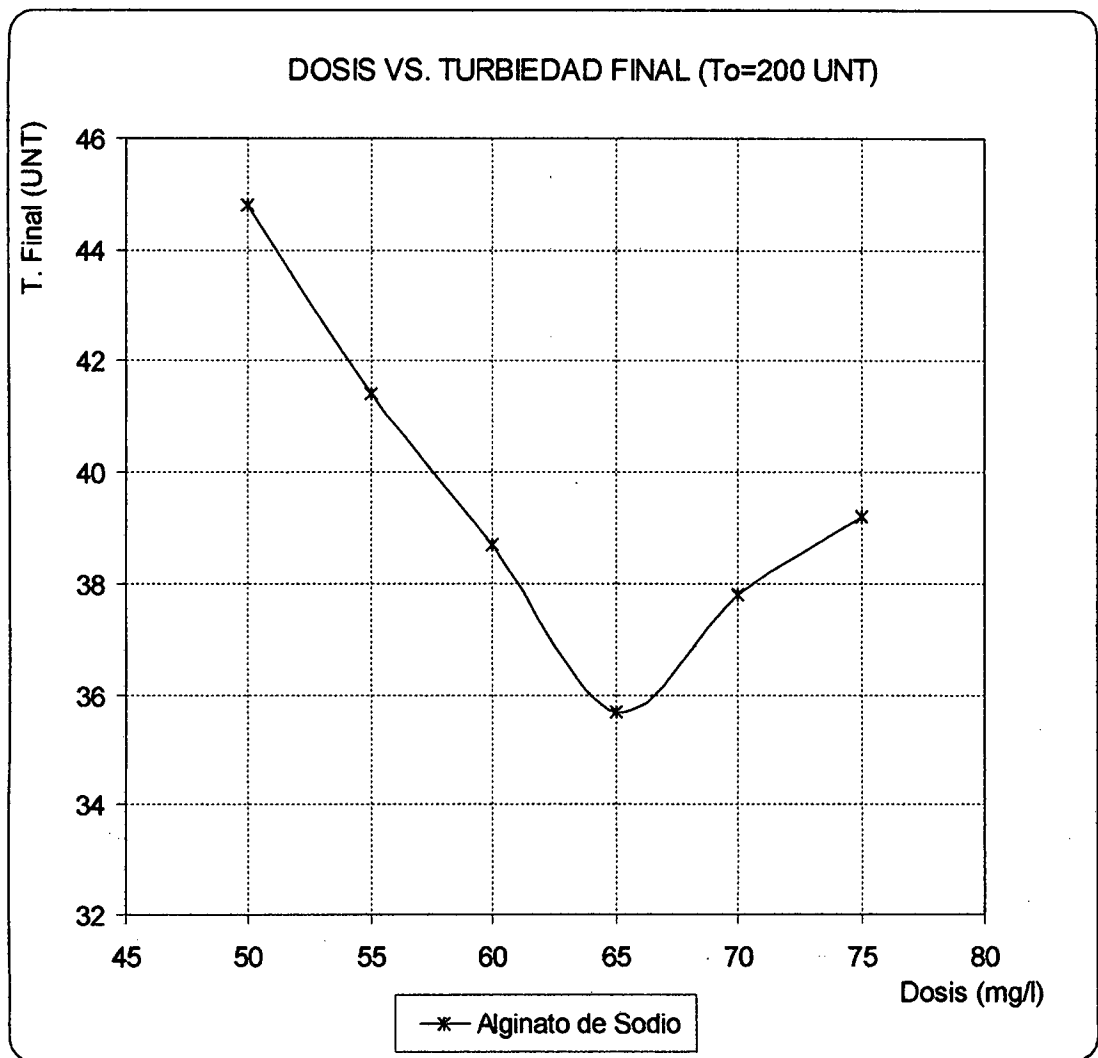


Figura 10.4 Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad inicial 200 UNT

### 10.1.5 RESULTADO DE LA DOSIS ÓPTIMA DEL ALGINATO DE SODIO PARA TURBIEDAD DE 300 UNT

<u>Características del agua</u>		<u>Reactivo</u>
Turbiedad inicial	= 300 UNT	Alginato de sodio
PH	= 7,960	Concentración = 1 %
Temperatura	= 18,1 °C	
Alcalinidad total	= 101 mg/l CaCO <sub>3</sub>	
Dureza total	= 292 mg/l CaCO <sub>3</sub>	

<u>Mezcla rápida</u>	<u>Mezcla lenta</u>	<u>Decantación</u>
V = 300 RPM	V = 40 RPM	T = 10 min.
T = 5 seg.	T = 20 min.	h = 6 cm.
G = 770 s <sup>-1</sup>	G = 52 s <sup>-1</sup>	

Cuadro 12 Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad de 300 UNT

Jarra	Dosis alginato (mg/l)	Volumen alginato (ml)	Turbiedad final (UNT)
1	55	11	52,2
2	60	12	46,1
3	65	13	42,7
4	70	14	38,1
5	75	15	39,9
6	80	16	41,2

Por lo tanto:

Turbiedad inicial = 300 UNT

Dosis óptima = 70 mg/l

Turbiedad final = 38,1 UNT

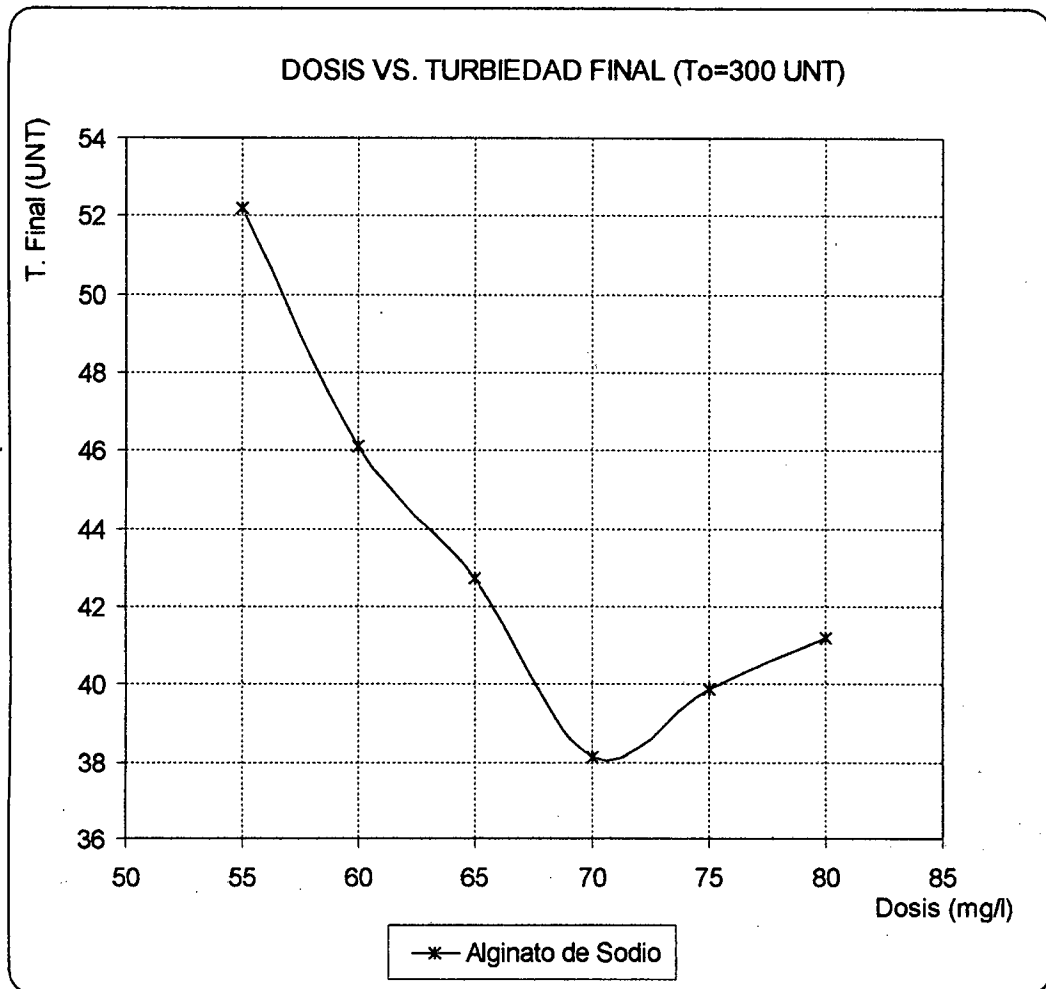


Figura 10.5 Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad inicial 100 UNT.

**10.1.6 RESULTADO DE LA DOSIS ÓPTIMA DEL ALGINATO DE SODIO PARA TURBIEDAD DE 400 UNT**

<u>Características del agua</u>		<u>Reactivo</u>
Turbiedad inicial	= 400 UNT	Alginato de sodio
PH	= 7,965	Concentración = 1 %
Temperatura	= 18,1 °C	
Alcalinidad total	= 101 mg/l CaCO <sub>3</sub>	
Dureza total	= 292 mg/l CaCO <sub>3</sub>	

<u>Mezcla rápida</u>	<u>Mezcla lenta</u>	<u>Decantación</u>
V = 300 RPM	V = 40 RPM	T = 10 min.
T = 5 seg.	T = 20 min.	h = 6 cm.
G = 770 s <sup>-1</sup>	G = 52 s <sup>-1</sup>	

**Cuadro 13 Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad de 400 UNT**

Jarra	Dosis alginato (mg/l)	Volumen alginato (ml)	Turbiedad final (UNT)
1	65	13	50,4
2	70	14	48,2
3	75	15	46,9
4	80	16	44,3
5	85	17	46,3
6	90	18	47,2

Por lo tanto:

Turbiedad inicial = 400 UNT  
Dosis óptima = 80 mg/l  
Turbiedad final = 44,3 UNT

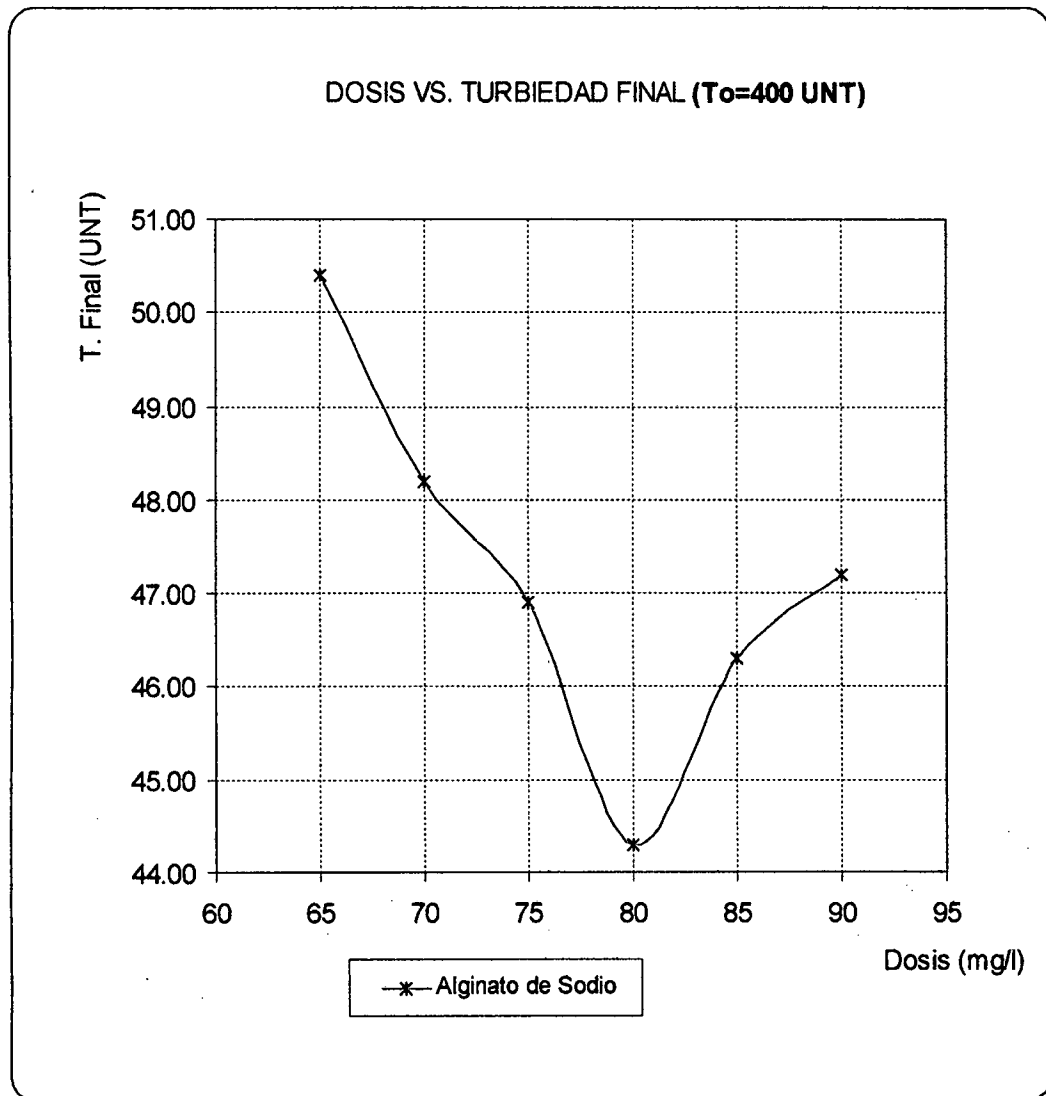


Figura 10.6 Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad inicial 400 UNT

10.1.7 RESUMEN DE RESULTADOS

Cuadro 14 Resumen de turbiedades finales obtenidas para las diferentes turbiedades analizadas.

Dosis (mg/l)	To= 50 UNT	To=100 UNT	To=150 UNT	To=200 UNT	To=300 UNT	To=400 UNT
30	15,1		37,6			
35	13,9	40,7				
40	11,8	36,6	32,3			
45	9,1	31,2				
50	11,2	29,1	29,7	44,8		
55	12,0	31,2		41,4	52,2	
60		33	28,5	38,7	46,1	
65				35,7	42,7	50,4
70			30,3	37,8	38,1	48,2
75				39,2	39,9	46,9
80			31,8		41,2	44,3
85						46,3
90						47,2

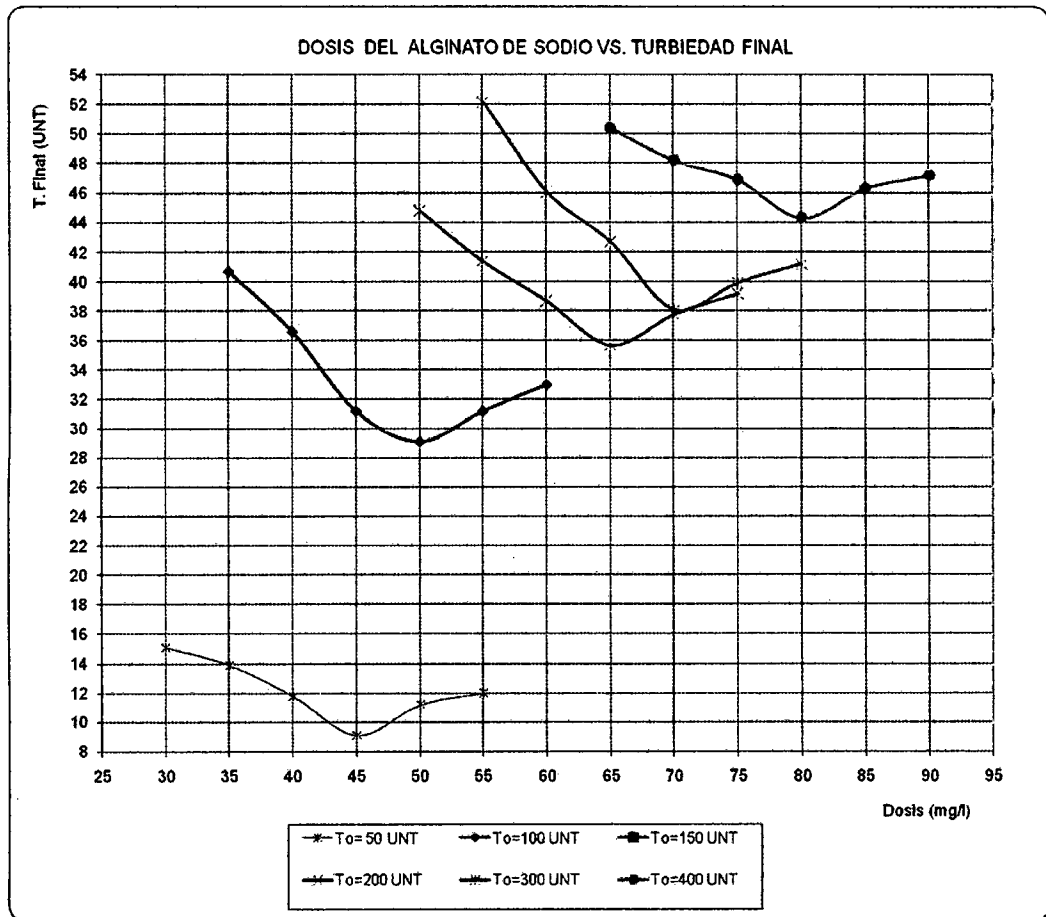


Figura 10.7 Resumen de turbiedades finales obtenidas para las diferentes turbiedades analizadas

Cuadro 15 Resumen de dosis óptimas del alginato de sodio al 1% para diferentes turbiedades iniciales.

Turbiedad inicial (UNT)	Dosis óptima (mg/l)	Volumen de alginato (ml)	Turbiedad final (UNT)
50	45	9	9,10
100	50	10	29,1
150	60	12	28,5
200	65	13	35,7
300	70	14	38,1
400	80	16	44,3

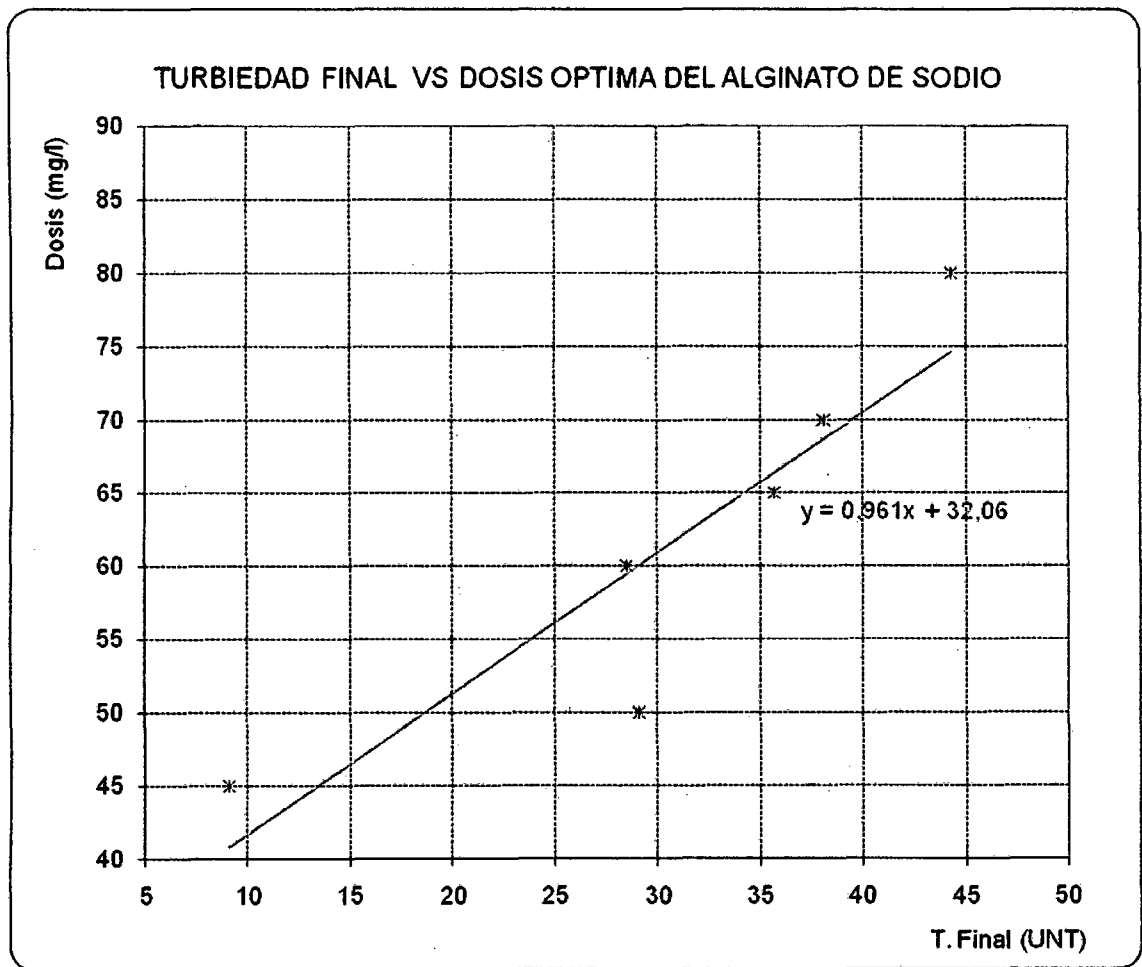


Figura 10.8 Resumen de dosis óptimas del alginato de sodio al 1% para diferentes turbiedades iniciales.



El alginato de sodio puede ser utilizado para la remoción de turbiedad, según lo demuestran las pruebas de jarras efectuadas a las diferentes muestras de agua preparada, porque las turbiedades finales obtenidas son menores que las iniciales. La remoción de la turbiedad está por encima del 80%.

Para poder seleccionar las turbiedades que se emplearán en los análisis posteriores con el alginato de sodio como ayudante de coagulación se tuvo como referencia los rangos de las turbiedades que realmente se tratan en la planta de tratamiento de agua potable de La Atarjea. Durante los meses de verano se tiene una alta turbiedad que se encuentran en el rango de 200 a 600 UNT y durante el resto del año se tiene una baja turbiedad en el rango de 6 a 50 UNT.

Por lo que se optó por seleccionar las turbiedades de 50 y 200 UNT seleccionándose una muestra de agua que este en el rango de baja turbiedad y otra en el rango de alta turbiedad, emulándose de esta manera lo que sucede en dicha PTAP.

## 10.2 RESULTADO DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE PARA UNA TURBIEDAD INICIAL DE 50 UNT.

En el presente ítem se mostrará los resultados obtenidos de los parámetros óptimos de diseño que son: la dosis óptima, tiempo óptimo de floculación y velocidad de decantación utilizando solo el sulfato de aluminio como coagulante primario para la remoción de la turbiedad de un agua artificial de 50 UNT.

### 10.2.1 RESULTADO DE DOSIS ÓPTIMA DEL SULFATO DE ALUMINIO

<u>Características del agua</u>		<u>Reactivo</u>
Turbiedad inicial	= 50 UNT	Sulfato de aluminio
PH	= 7,930	Concentración = 1 %
Temperatura	= 18,1 °C	
Alcalinidad total	= 101 mg/l CaCO <sub>3</sub>	
Dureza total	= 292 mg/l CaCO <sub>3</sub>	

<u>Mezcla rápida</u>		<u>Mezcla lenta</u>	<u>Decantación</u>		
V	= 300 RPM	V	= 40 RPM	T	= 10 min.
T	= 5 seg.	T	= 20 min.	h	= 6 cm.
G	= 770 s <sup>-1</sup>	G	= 52 s <sup>-1</sup>		

Cuadro 16 Dosis óptima del sulfato de aluminio para turbiedad de 50 UNT

Jarra	Dosis de sulfato (mg/l)	Volumen de sulfato (ml)	Turbiedad final (UNT)
1	5	1	8,23
2	10	2	6,73
3	15	3	3,81
4	20	4	2,56
5	25	5	3,15
6	30	6	3,50

z

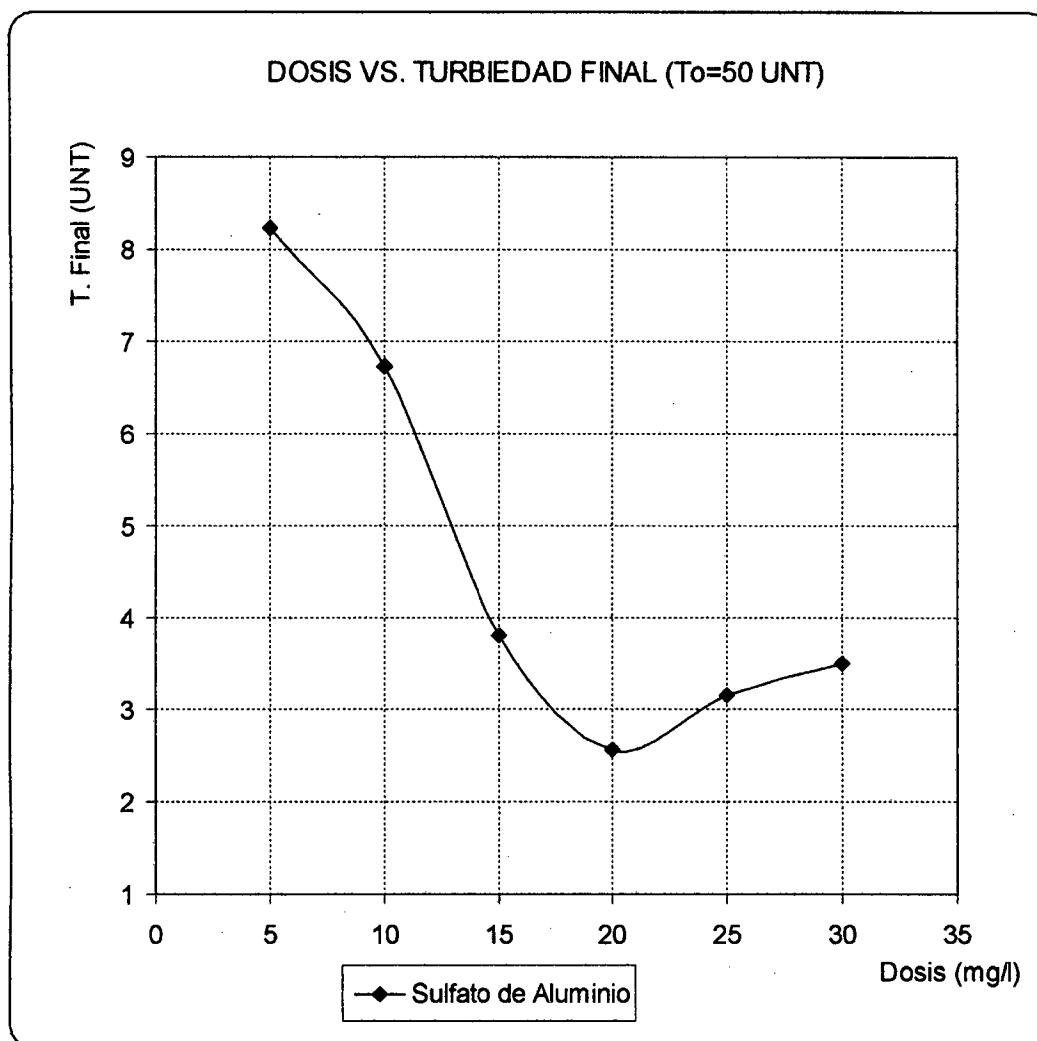


Figura 10.9 Dosis óptima del sulfato de aluminio para turbiedad inicial 50 UNT

### 10.2.2 RESULTADO DE PARÁMETROS DE FLOCULACIÓN

<u>Características del agua</u>		<u>Reactivo</u>	
Turbiedad inicial	= 50 UNT	Sulfato de aluminio	
PH	= 7,930	Concentración	= 1 %
Temperatura	= 18,1 °C	Dosis óptima	= 20 mg/l
Alcalinidad total	= 101 mg/l CaCO <sub>3</sub>	Volumen	= 4 ml
Dureza total	= 292 mg/l CaCO <sub>3</sub>		

<u>Mezcla rápida</u>		<u>Decantación</u>	
Velocidad	= 300 RPM	Tiempo	= 10 min.
Tiempo	= 5 seg.	h	= 6 cm.
Gradiente de velocidad	= 770 s <sup>-1</sup>		

Cuadro 17 Parámetros de floculación del sulfato de aluminio para turbiedad inicial de 50 UNT

Tiempo (minutos)	Gradientes de velocidad (s <sup>-1</sup> )			
	80	60	40	20
5	31,12	45,1	52,8	54,9
10	9,62	8,94	29,8	47,0
15	9,93	2,42	5,02	14,6
20	24,12	3,84	3,72	12,1
25	16,10	1,89	2,09	5,49
30	23,90	1,52	2,32	6,20

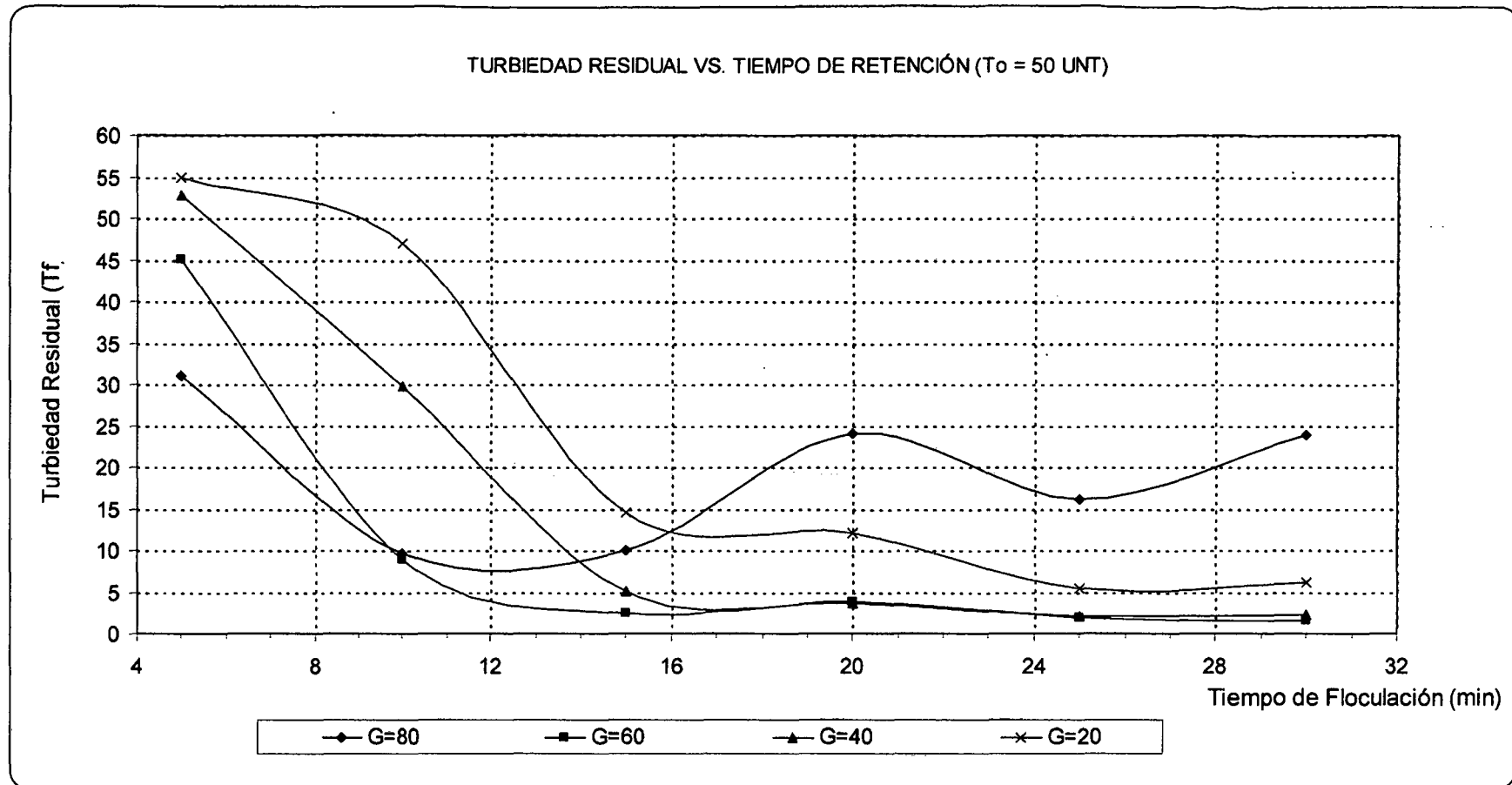


Figura 10.10 Determinación del tiempo óptimo de duración de la mezcla lenta para las diferentes gradientes de velocidad.

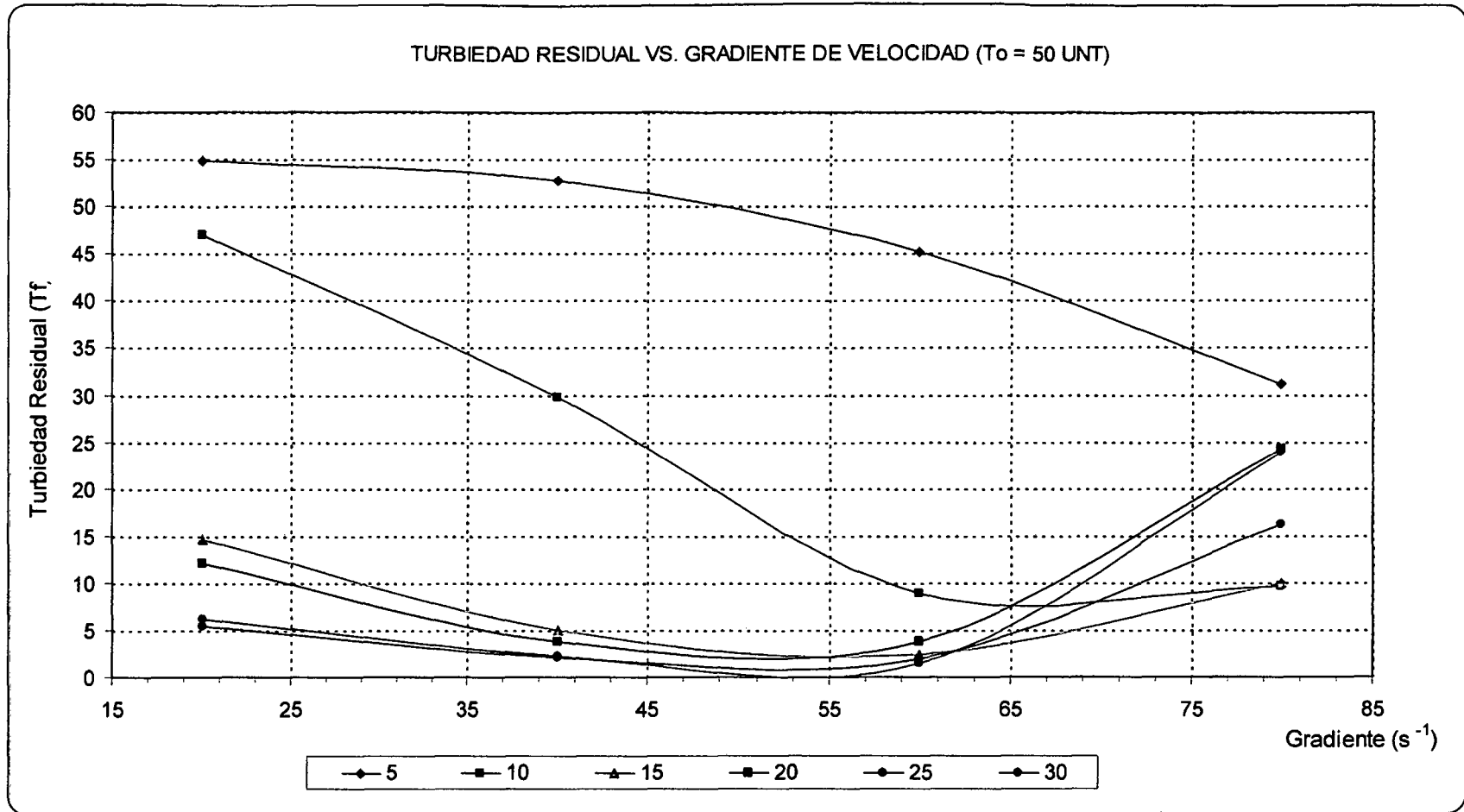


Figura 10.11 Determinación de las gradientes de velocidad para los diferentes tiempos de mezcla lenta.

De la figura 10.10 "Turbiedad residual vs Tiempo de retención" se puede observar que el tiempo óptimo es 25 minutos en donde se obtuvo una turbiedad final de 2,09 UNT.

De la figura 10.11 "Turbiedad residual vs Gradiente de velocidad" se obtuvieron los siguientes valores óptimos:

Punto	1	2	3	4	5	6
t (min)	5	10	15	20	25	30
G (s-1)	80	65	57	52	53	55

Se tendrá la ecuación de la recta:

$$Y = a + bX$$

Donde:

$$\text{Log } G = Y$$

$$\text{Log } T = X$$

Entonces se obtiene:

$$\text{Log } G = a + b \text{Log } T$$

Por mínimos cuadrados obtenemos los siguientes valores:

X	Y	XY	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>
LogT	LogG	LogT.LogG	LogT <sup>2</sup>	LogG <sup>2</sup>
0,70	1,90	1,33	0,49	3,62
1,00	1,81	1,81	1,00	3,29
1,18	1,76	2,07	1,38	3,08
1,30	1,72	2,23	1,69	2,94
1,40	1,72	2,41	1,95	2,97
1,48	1,74	2,57	2,18	3,03
Σ	7,05	12,42	8,70	18,94

$$\sum_{i=1}^n Y_i = an + b \sum_{i=1}^n X_i$$

$$\sum_{i=1}^n Y_i X_i = a \sum_{i=1}^n X_i + b \sum_{i=1}^n X_i^2$$

Resolviendo se obtienen los siguientes valores:

$$a = 2,05$$

$$b = -0,23$$

$$r = -0,95$$

$$r^2 = 0,90$$

Reemplazando:

$$\text{Log } G = 2,050249 - 0,2338585 \text{ Log } T$$

Reagrupando y aplicando antilogaritmos se encuentra la siguiente ecuación:

$$G^n T = K$$

$$n = 4,27608927$$

$$k = 8,76704657$$

Teniendo los valores de n y k hallamos la ecuación de la gradiente de velocidad para una turbiedad inicial de 50 UNT:

$$G^{4,27608927} T = 8,76704657$$

Se halló que el tiempo total para la mezcla lenta es 25 minutos, con este tiempo hallamos las diferentes gradientes de velocidad que sirvió de base



para la floculación.

Teniendo en cuenta que la mezcla lenta se desarrolló en tres etapas para un tiempo total de 25 minutos se hallaron los siguientes valores:

Tiempo parcial (min)	8	8	9
Tiempo acumulado (min)	8	16	25
Gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ )	69	59	53
Velocidad (RPM)	50	45	42

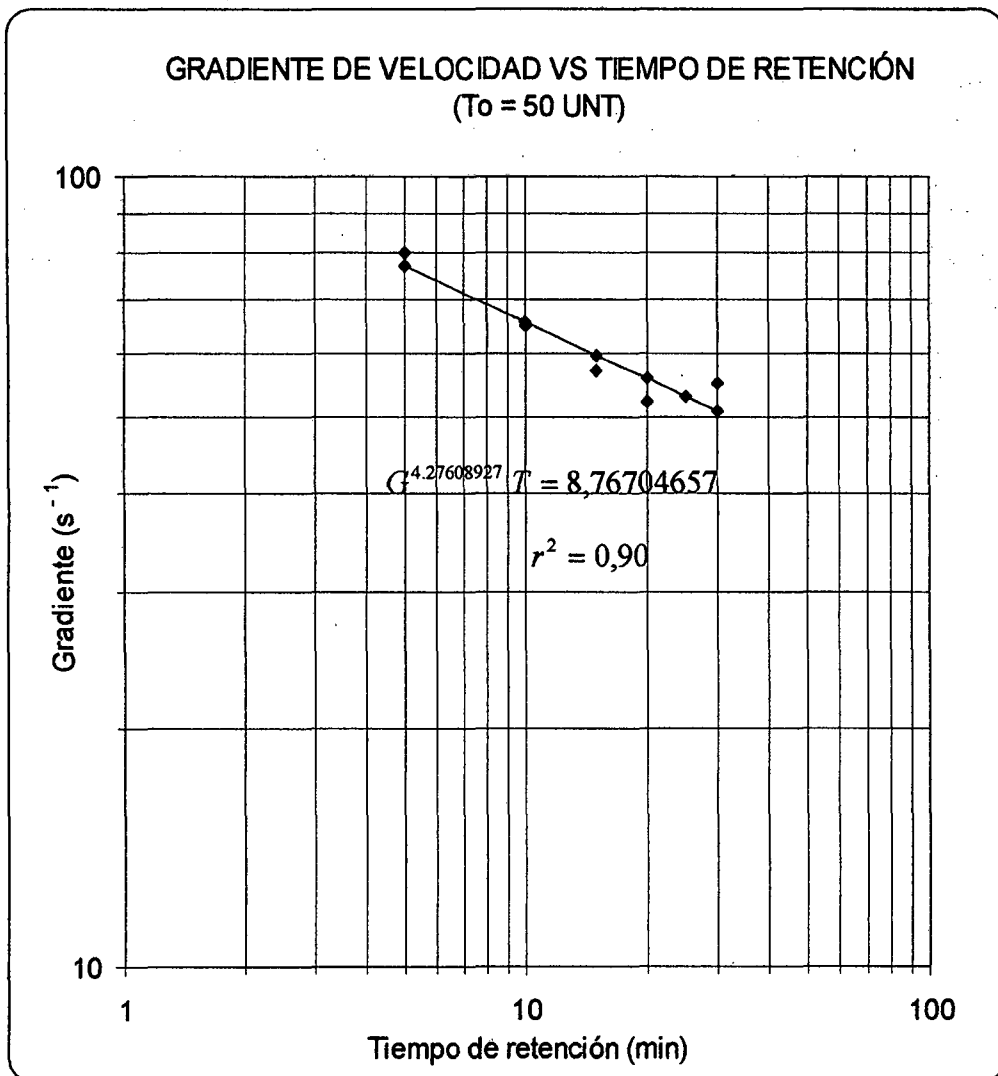


Figura 10.12 Recta de gradiente de velocidad para los diferentes tiempos de mezcla lenta.

**10.2.3 RESULTADO DE LOS PARÁMETROS DE DECANTACIÓN PARA TURBIEDAD INICIAL DE 50 UNT**

<u>Características del agua</u>		<u>Reactivo</u>	
Turbiedad inicial	= 50 UNT	Sulfato de aluminio	
PH	= 7,930	Concentración	= 1 %
Temperatura	= 18,1 °C	Dosis óptima	= 20 mg/l
Alcalinidad total	= 101 mg/l CaCO <sub>3</sub>	Volumen	= 4 ml
Dureza total	= 292 mg/l CaCO <sub>3</sub>		

Mezcla rápida

Velocidad	=	300 RPM
Tiempo	=	5 seg.
Gradiente de velocidad	=	770 s <sup>-1</sup>

Mezcla lenta

Tiempo parcial (min)	8	8	9
Gradiente de velocidad (s <sup>-1</sup> )	69	59	53
Velocidad (RPM)	50	45	42

Decantación

Tiempo	=	1 - 10 min.	h	=	6 cm
--------	---	-------------	---	---	------

Cuadro 18 Determinación de la velocidad óptima de decantación del Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>

Jarra	Tiempo (minutos)	Vel. decantación Vs (cm/s)	Turbiedad final Tf (UNT)	Fracción remanente (Co)
1	1	0,100	39,60	0,792
2	2	0,050	27,20	0,544
3	3	0,033	13,80	0,276
4	4	0,025	7,36	0,147
5	5	0,020	5,21	0,104
6	10	0,010	3,29	0,066

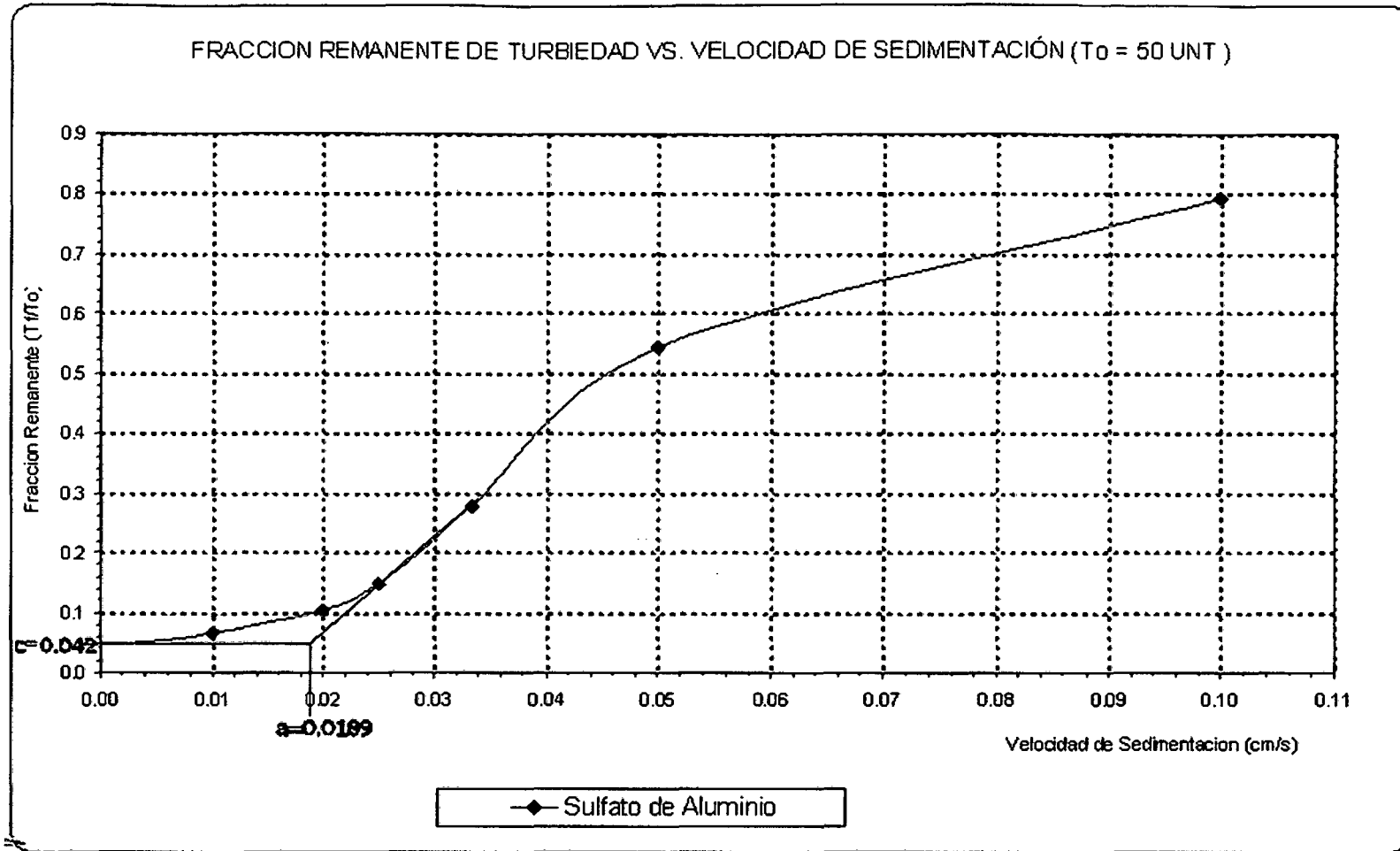


Figura 10.13 Determinación de la velocidad óptima de decantación para el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Determinación de la remoción total, basada en criterio de selección de la tasa de decantación (q), según la fórmula siguiente:

$$R_t = [1 - (C_o - C_f)] + \left( \frac{a + V_s}{2 V_s} \right) (C_o + C_f)$$

Donde: T : Tiempo de decantación.  
Vs : Velocidad de decantación.  
To : Turbiedad inicial = 50 UNT.  
Tf : Turbiedad final.  
Tr : Turbiedad removida.

De la  $C_o = T_f / T_o$  : Fracción remanente de turbiedad.  
figura anterior podemos encontrar los siguientes valores iniciales:

$$a = 0,01890 \qquad C_f = 0,042$$

Con estos valores podremos hallar la tasa de decantación adecuada

Cuadro 19 Selección de la tasa de decantación del  $Al_2(SO_4)_3$  para una turbiedad inicial de 50 UNT

q (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d)	Vs (cm/s)	Co=Tf/To	1-(Co-Cf)	R <sub>t</sub>	Tr	Tf
20	0,023	0,125	0,917	0,9924	49,619	0,381
22	0,025	0,155	0,887	0,9854	49,272	0,728
24	0,028	0,188	0,855	0,9767	48,837	1,163
26	0,030	0,225	0,817	0,9660	48,298	1,702
<b>27</b>	<b>0,031</b>	<b>0,243</b>	<b>0,799</b>	<b>0,9603</b>	<b>48,014</b>	<b>1,986</b>
28	0,032	0,261	0,781	0,9543	47,715	2,285
30	0,035	0,307	0,735	0,9396	46,981	3,019

Del cuadro seleccionamos la tasa de decantación:

$$q = 27 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$$

Con la que obtenemos: Tf = 1,986 UNT, ya que se cumple: Tf ≤ 2UNT,

### 10.3 RESULTADO DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE PARA UNA TURBIEDAD INICIAL DE 200 UNT

En el presente ítem se mostrará los resultados obtenidos de los parámetros óptimos de diseño que son: la dosis óptima, tiempo óptimo de floculación y velocidad de decantación utilizando solo el sulfato de aluminio como coagulante primario para la remoción de la turbiedad en un agua artificial de 200 UNT.

#### 10.3.1 RESULTADO DE DOSIS ÓPTIMA DEL SULFATO DE ALUMINIO

<u>Características del agua</u>		<u>Reactivo</u>
Turbiedad inicial	= 200 UNT	Sulfato de aluminio
PH	= 7,93	Concentración = 1 %
Temperatura	= 18,1 °C	
Alcalinidad total	= 101 mg/l CaCO <sub>3</sub>	
Dureza total	= 292 mg/l CaCO <sub>3</sub>	

<u>Mezcla rápida</u>	<u>Mezcla lenta</u>	<u>Decantación</u>
V = 300 RPM	V = 40 RPM	T = 10 min.
T = 5 seg.	T = 20 min.	h = 6 cm.
G = 770 s <sup>-1</sup>	G = 52 s <sup>-1</sup>	

Cuadro 20 Dosis óptima del sulfato de aluminio para turbiedad inicial de 200 UNT

Jarra	Dosis de sulfato (mg/l)	Volumen de sulfato (ml)	Turbiedad final (UNT)
1	10	2	14,80
2	15	3	7,95
3	20	4	6,82
4	25	5	5,06
<b>5</b>	<b>30</b>	<b>6</b>	<b>2,80</b>
6	35	7	4,27

Por lo tanto:

Turbiedad inicial = 200 UNT

Dosis óptima = 30 mg/l

Turbiedad final = 2,80 UNT

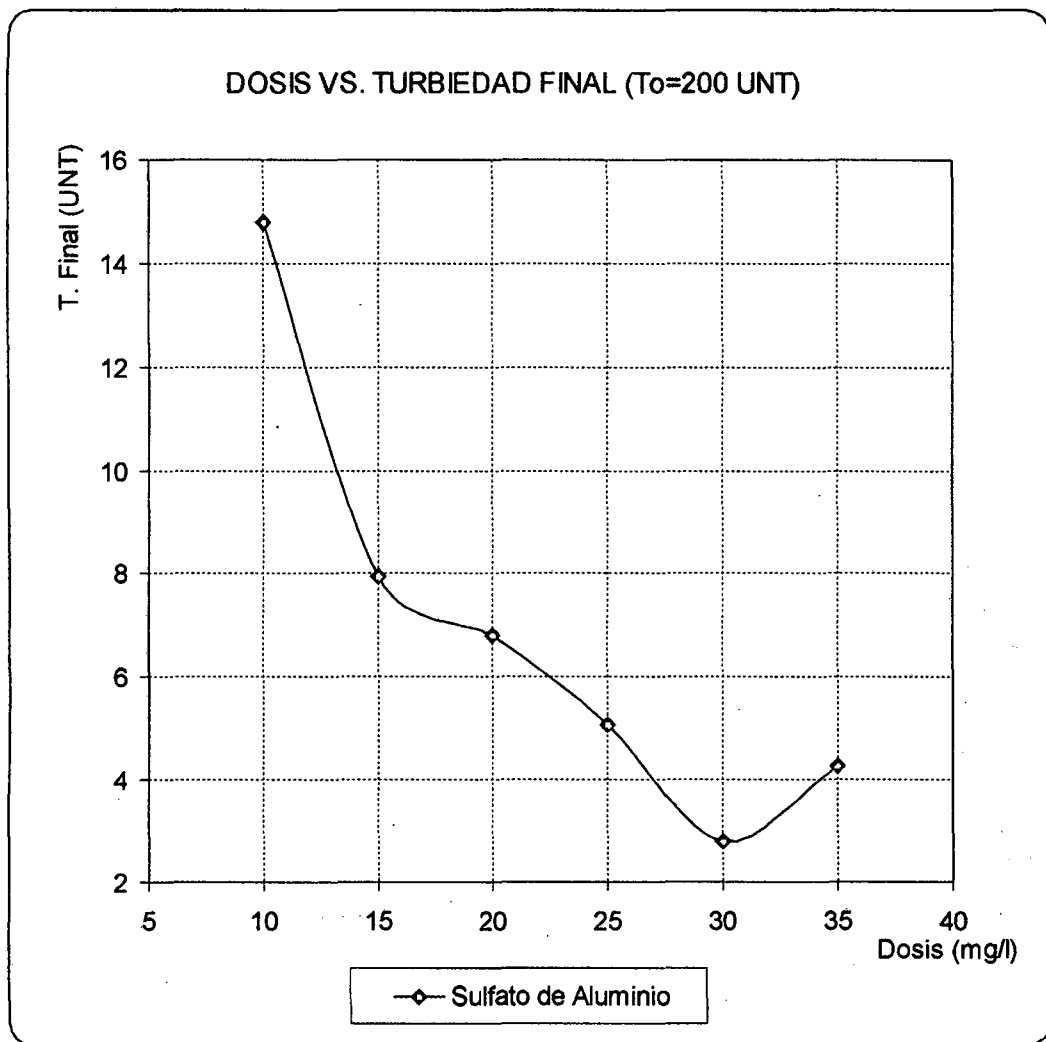


Figura 10.14 Dosis óptima del sulfato de aluminio para turbiedad inicial 200 UNT.

10.3.2 **RÉSPULTADO DE PARÁMETROS DE FLOCULACIÓN:**

<u>Características del agua</u>		<u>Reactivo</u>	
Turbiedad inicial	= 200 UNT	Sulfato de aluminio	
PH	= 7,930	Concentración	= 1 %
Temperatura	= 18,1 °C	Dosis óptima	= 30 mg/l
Alcalinidad total	= 101 mg/l CaCO <sub>3</sub>	Volumen	= 6 ml
Dureza total	= 292 mg/l CaCO <sub>3</sub>		

<u>Mezcla rápida</u>		<u>Decantación</u>	
Velocidad	= 300 RPM	Tiempo	= 10 min.
Tiempo	= 5 seg.	h	= 6 cm.
Gradiente de velocidad	= 770 s <sup>-1</sup>		

Cuadro 21 Parámetros de floculación del sulfato de aluminio para turbiedad inicial de 200 UNT

Tiempo (minutos)	Gradientes de velocidad (s <sup>-1</sup> )			
	80	60	40	20
5	14,2	18,2	29,6	75,7
10	6,25	5,47	8,7	24,1
15	3,51	2,95	6,49	15,3
20	8,36	6,40	5,23	13,8
25	4,16	2,40	2,31	8,68
30	8,15	5,12	2,56	7,60

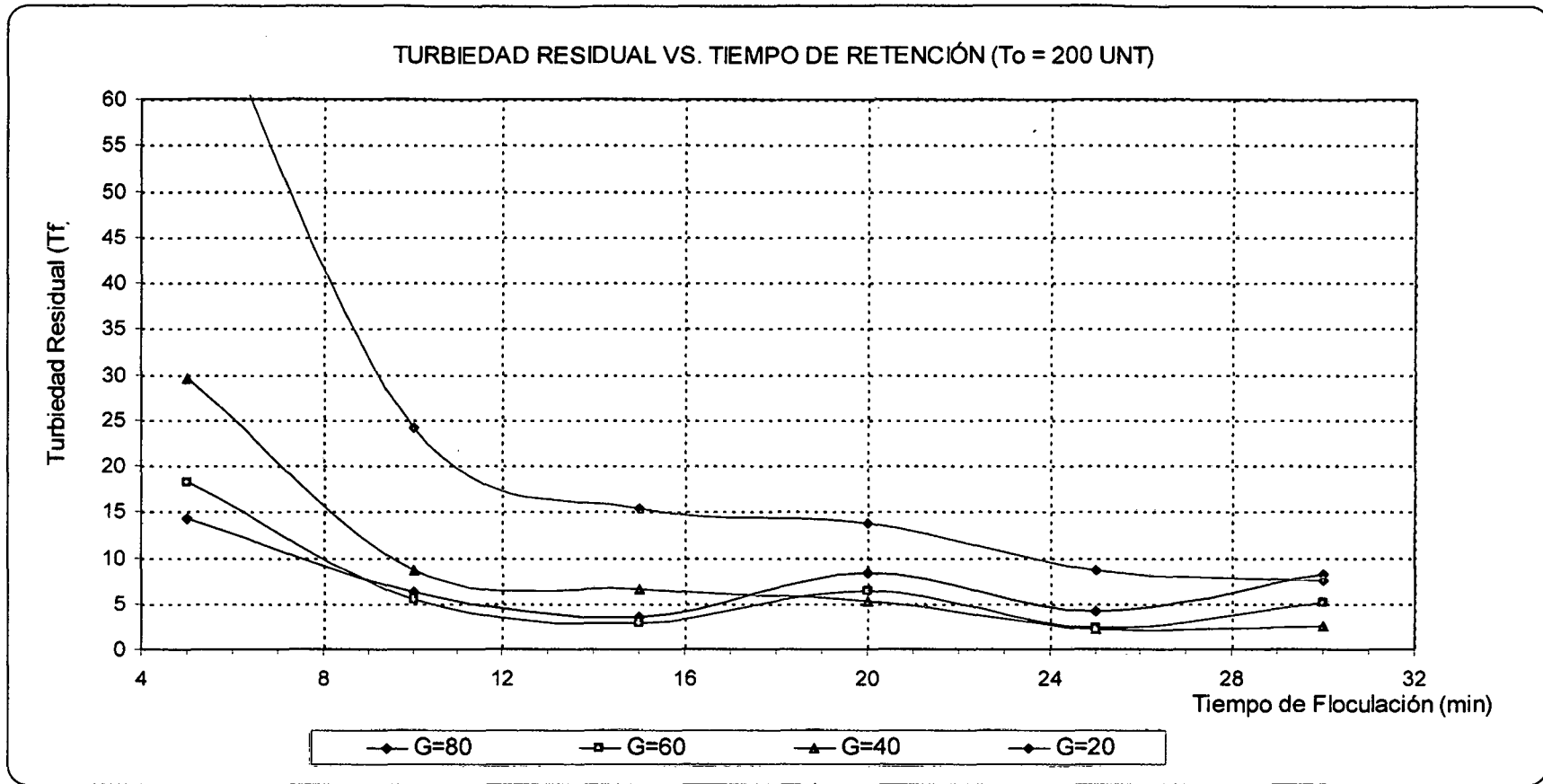


Figura 10.15 Determinación del tiempo óptimo de duración de la mezcla lenta para las diferentes gradientes de velocidad.



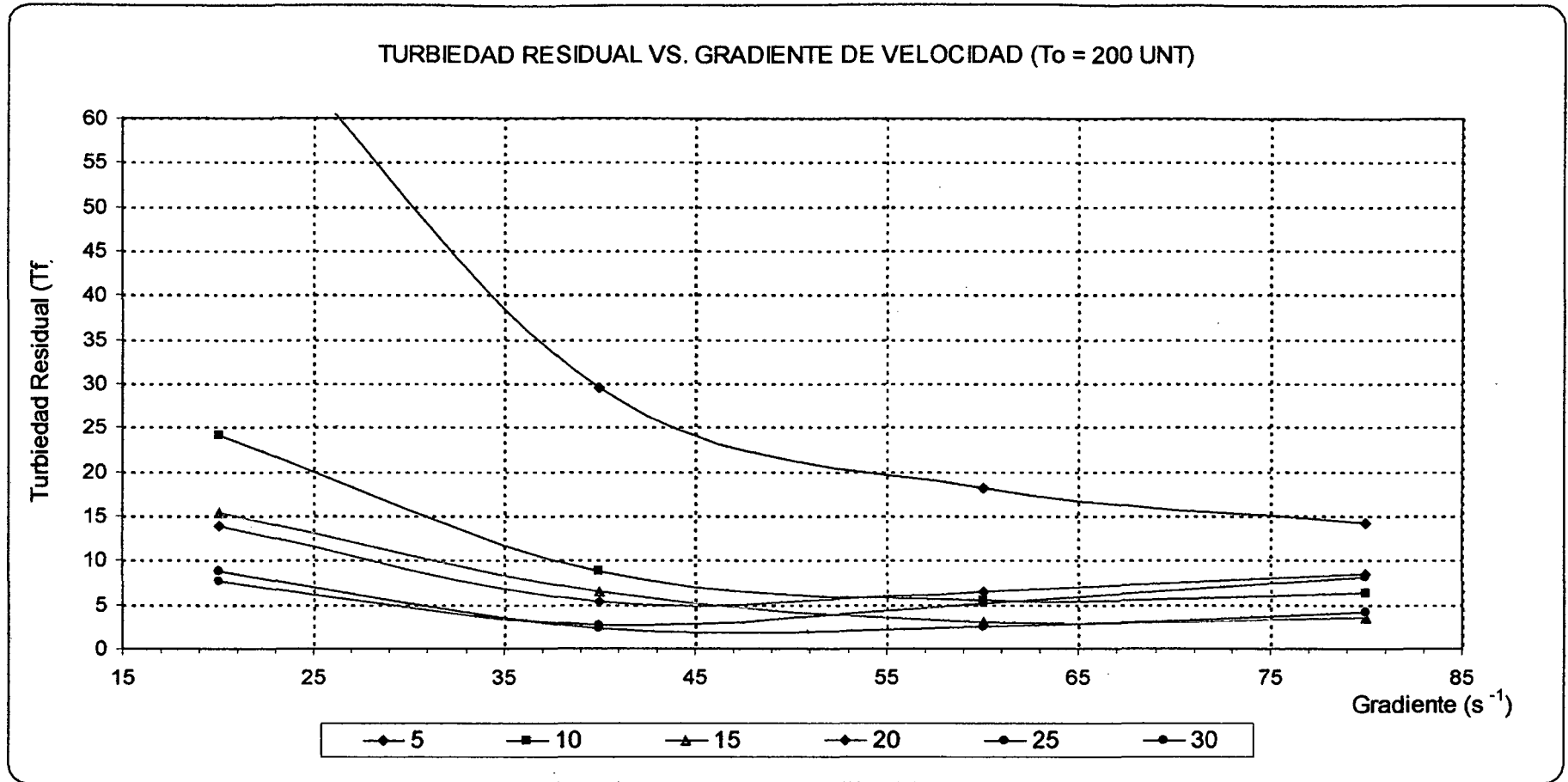


Figura 10.16 Determinación de las gradientes para los diferentes tiempos de mezcla lenta.

De la figura 10.15 "Turbiedad residual vs Tiempo de retención" se puede observar que el tiempo óptimo es 25 minutos en donde se obtuvo una turbiedad final de 2,31 UNT.

De la figura 10.16 "Turbiedad residual vs Gradiente de velocidad" se obtuvieron los siguientes valores óptimos:

Punto	1	2	3	4	5	6
t (min)	5	10	15	20	25	30
G (s-1)	80	63	64	44	46	42

Se tendrá la ecuación de la recta:

$$Y = a + bX$$

Donde:  $\text{Log } G = Y$

$\text{Log } T = X$

Entonces se obtiene:

$$\text{Log } G = a + b \text{Log } T$$

Por mínimos cuadrados obtenemos los siguientes valores:

X	Y	XY	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>
LogT	LogG	LogT.LogG	LogT <sup>2</sup>	LogG <sup>2</sup>
0,70	1,90	1,33	0,49	3,62
1,00	1,80	1,80	1,00	3,24
1,18	1,81	2,12	1,38	3,26
1,30	1,64	2,14	1,69	2,70
1,40	1,66	2,32	1,95	2,76
1,48	1,62	2,40	2,18	2,63
$\Sigma$	7,05	10,44	8,70	18,22

$$\sum_{i=1}^n Y_i = an + b \sum_{i=1}^n X_i$$

$$\sum_{i=1}^n Y_i X_i = a \sum_{i=1}^n X_i + b \sum_{i=1}^n X_i^2$$

Resolviendo se obtienen los siguientes valores:

$$a = 2,17$$

$$b = -0,37$$

$$r = -0,95$$

$$r^2 = 0,90$$

Reemplazando:

$$\text{Log } G = 2,17278 - 0,36854 \text{ Log } T$$

Reagrupando y aplicando antilogaritmos se encuentra la siguiente ecuación:

$$G^n T = K$$

$$n = 2,71343$$

$$k = 5,89569$$

Teniendo los valores de n y k hallamos la ecuación de la gradiente de velocidad para una turbiedad inicial de 200 UNT:

$$G^{2,71343} T = 5,89569$$

Se halló que el tiempo total para la mezcla lenta es 25 minutos, con este tiempo hallamos las diferentes gradientes de velocidad que sirvieron de base para la floculación.

Teniendo en cuenta que la mezcla lenta se desarrolló en tres etapas para un tiempo total de 25 minutos se hallaron los siguientes valores:

Tiempo parcial (min)	8	8	9
Tiempo acumulado (min)	8	16	25
Gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ )	69	54	45
Velocidad (RPM)	49	41	37

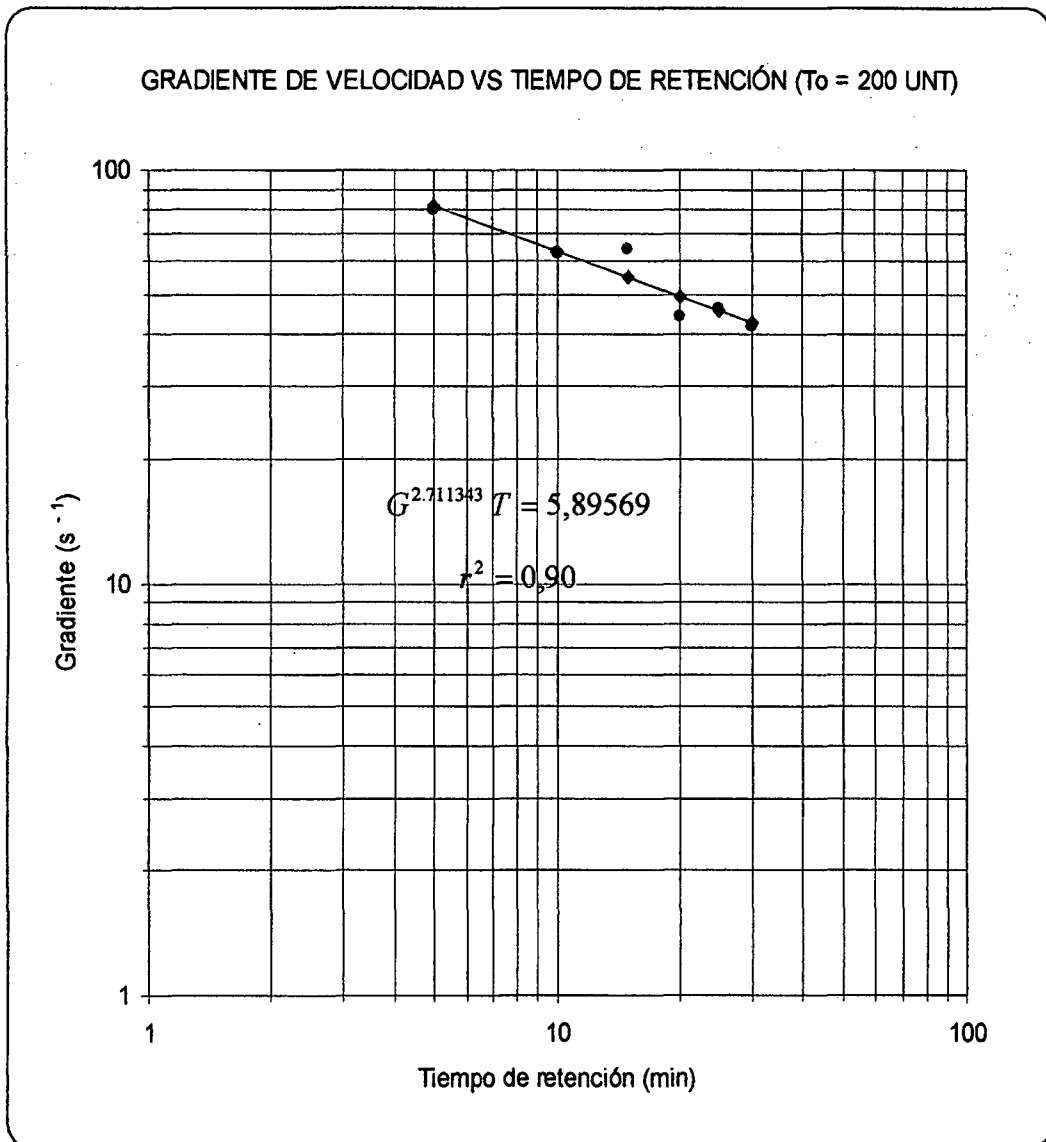


Figura 10.17 Recta de gradiente de velocidad para los diferentes tiempos de mezcla lenta

**10.3.3 RESULTADO DE LOS PARÁMETROS DE SEDIMENTACIÓN PARA TURBIEDAD INICIAL DE 200 UNT**

<u>Características del agua</u>		<u>Reactivo</u>	
Turbiedad inicial	= 200 UNT	Sulfato de aluminio	
PH	= 7,925	Concentración	= 1 %
Temperatura	= 18,1 °C	Dosis óptima	= 30 mg/l
Alcalinidad total	= 101 mg/l CaCO <sub>3</sub>	Volumen	= 6 ml
Dureza total	= 292 mg/l CaCO <sub>3</sub>		

Mezcla rápida

Velocidad	= 300 RPM
Tiempo	= 5 seg.
Gradiente de velocidad	= 770 s <sup>-1</sup>

Mezcla lenta

Tiempo parcial (min)	8	8	9
Gradiente de velocidad (s <sup>-1</sup> )	69	54	45
Velocidad (RPM)	49	41	37

**Cuadro 22 Determinación de la velocidad óptima de decantación del Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>**

Jarra	Tiempo (minutos)	Vel. decantación Vs (cm/s)	Turbiedad final Tf (UNT)	Fracción remanente (Co)
1	1	0,100	74,10	0,371
2	2	0,050	62,00	0,310
3	3	0,033	35,10	0,176
4	4	0,025	21,40	0,107
5	5	0,020	14,00	0,070
6	10	0,010	10,80	0,054

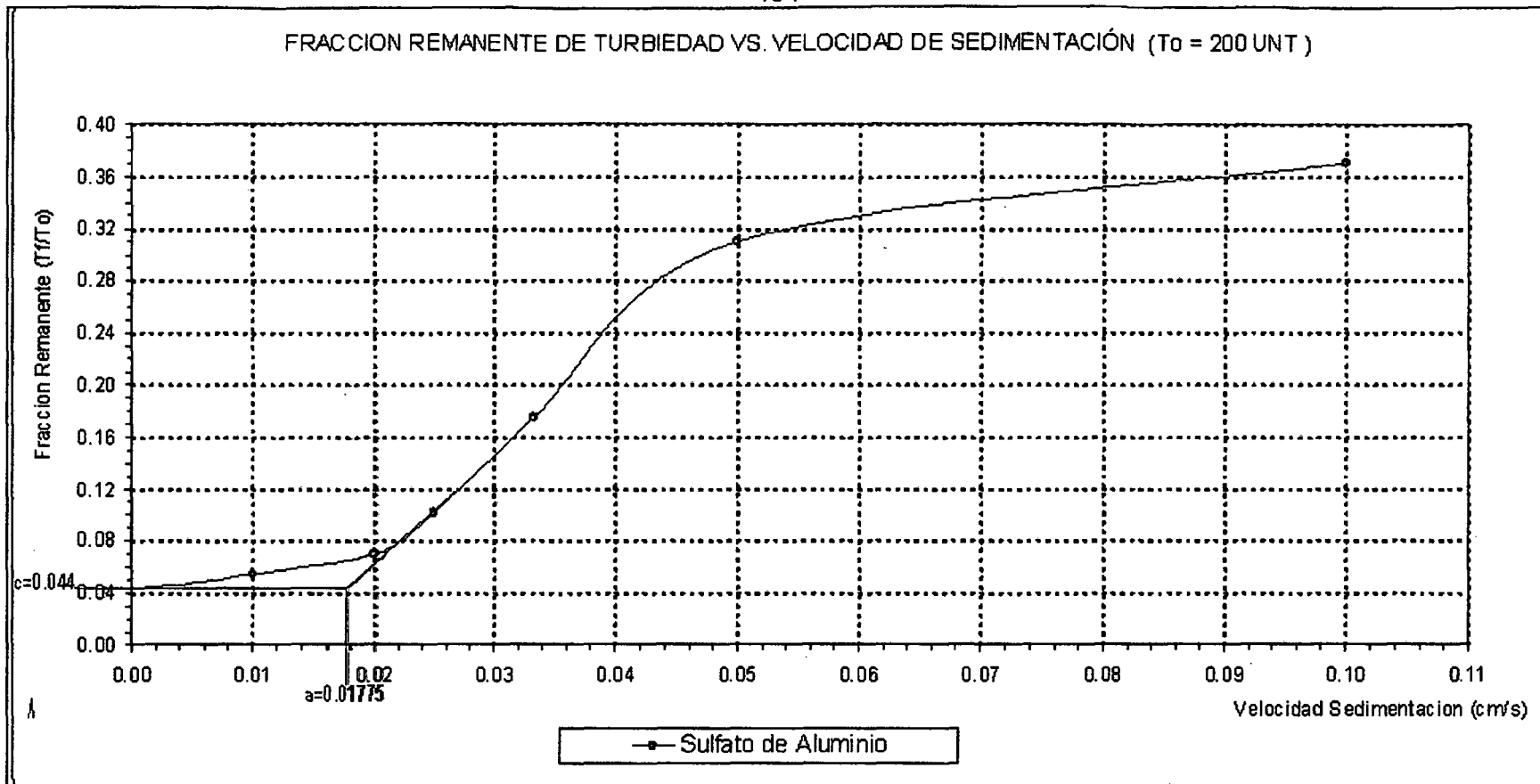


Figura 10.18 Determinación de la velocidad óptima de decantación para el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Determinación de la remoción total, basado en el criterio de selección de la tasa de decantación (q), según la fórmula siguiente:

$$R_t = [1 - (C_o - C_f)] + \left( \frac{a + V_s}{2V_s} \right) (C_o + C_f)$$

Donde:

- T : Tiempo de decantación.
- Vs : Velocidad de decantación.
- To : Turbiedad inicial = 50 UNT.
- Tf : Turbiedad final.
- Tr : Turbiedad removida.
- Co=Tf / To : Fracción remanente de turbiedad.

De la figura anterior podemos encontrar los siguientes valores iniciales:

$$a = 0,01775 \qquad \qquad \qquad C_f = 0,044$$

Con estos valores podremos hallar la tasa de decantación adecuada

**Cuadro 23** Selección de la tasa de decantación del  $Al_2(SO_4)_3$  para una turbiedad inicial de 200 UNT

q (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d)	Vs (cm/s)	Co=Tf/To	1-(Co-Cf)	R <sub>t</sub>	Tr	Tf
20	0,0231	0,089	0,955	0,9948	198,951	1,049
21	0,0243	0,102	0,942	0,9922	198,436	1,564
22	0,0255	0,110	0,934	0,9900	198,001	1,999
23	0,0266	0,120	0,925	0,9874	197,484	2,516
24	0,0278	0,130	0,914	0,9845	196,895	3,105
25	0,0289	0,138	0,906	0,9818	196,366	3,634
30	0,035	0,193	0,851	0,9636	192,717	7,283

Del cuadro seleccionamos la tasa de decantación:

$$q = 22 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$$

Con la que obtenemos: Tf = 1,999 UNT, ya que se cumple: Tf ≤ 2UNT.

#### 10.4 RESULTADO DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DEL SULFATO DE ALUMINIO Y ALGINATO DE SODIO PARA UNA TURBIEDAD INICIAL DE 50 UNT

En el presente ítem se mostrará los resultados obtenidos de los parámetros óptimos de diseño que son: la dosis óptima, concentración óptima, tiempo óptimo de floculación y velocidad de decantación utilizando el sulfato de aluminio como coagulante y el alginato de sodio como ayudante de coagulación para la remoción de la turbiedad en un agua artificial de 50 UNT

##### 10.4.1 RESULTADO DE DOSIS ÓPTIMA DEL ALGINATO DE SODIO COMO AYUDANTE DE COAGULACIÓN

<u>Características del agua</u>		<u>Reactivo</u>
Turbiedad inicial	= 50 UNT	Sulfato de aluminio
PH	= 7,930	Concentración = 1 %
Temperatura	= 18,1 °C	Alginato de sodio
Alcalinidad total	= 101 mg/l CaCO <sub>3</sub>	Concentración = 1 %
Dureza total	= 292 mg/l CaCO <sub>3</sub>	Inicial

Cuadro 24 Dosis óptima del alginato de sodio para turbiedad inicial de 50 UNT

Jarra	Dosis (mg/l)		Volumen (ml)		Turbiedad final (UNT)
	Sulfato de aluminio	Alginato de sodio	Sulfato de aluminio	Alginato de sodio	
1	10	15	2,0	3	6,12
2	10	20	2,0	4	5,95
3	10	25	2,0	5	5,63
4	10	30	2,0	6	4,20
5	10	35	2,0	7	5,34
6	10	40	2,0	8	6,50



Por lo tanto:

Turbiedad Inicial	=	50 UNT
Dosis sulfato de aluminio	=	10 mg/l
Dosis óptima alginato de sodio	=	30 mg/l
Turbiedad final	=	4,20 UNT

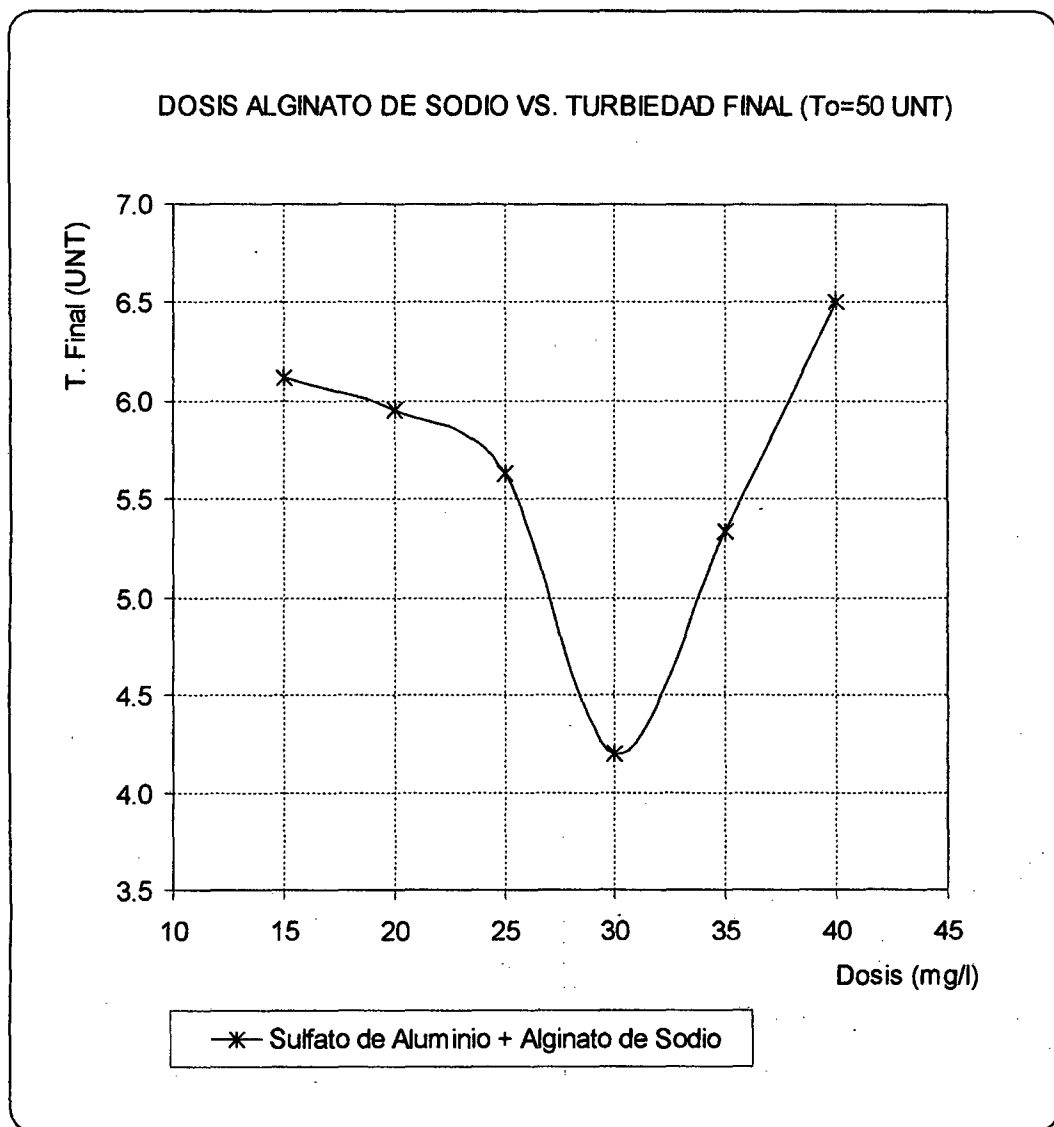


Figura 10.19 Dosis óptima del alginato de sodio como ayudante de

coagulación para turbiedad inicial 50 UNT

**10.4.2 RESULTADO DE DOSIS ÓPTIMA DEL SULFATO DE ALUMINIO  
COMO COAGULANTE**

<u>Características del agua</u>		<u>Reactivos</u>	
Turbiedad inicial	= 50 UNT	Sulfato de aluminio	
PH	= 7,930	Concentración	= 1 %
Temperatura	= 18,1 °C	Alginato de sodio	
Alcalinidad total	= 101 mg/l CaCO <sub>3</sub>	Dosis óptima	= 30 mg/l
Dureza total	= 292 mg/l CaCO <sub>3</sub>	Concentración Inicial	= 1 %

<u>Mezcla rápida</u>	<u>Mezcla lenta</u>	<u>Decantación</u>
V = 300 RPM	V = 40 RPM	T = 10 min.
T = 5 seg.	T = 20 min.	h = 6 cm.
G = 770 s <sup>-1</sup>	G = 40 s <sup>-1</sup>	

**Cuadro 25 Dosis óptima del sulfato de aluminio para turbiedad inicial de 50 UNT**

Jarra	Dosis (mg/l)		Volumen (ml)		Turbiedad final (UNT)
	Sulfato de aluminio	Alginato de sodio	Sulfato de aluminio	Alginato de sodio	
1	5	30	1,0	6,0	7,11
2	10	30	2,0	6,0	6,28
3	15	30	3,0	6,0	2,65
4	20	30	4,0	6,0	1,74
5	25	30	5,0	6,0	2,28
6	30	30	6,0	6,0	5,04

Por lo tanto:

Turbiedad Inicial	=	50 UNT
Dosis óptima sulfato de aluminio	=	20 mg/l
Dosis óptima alginato de sodio	=	30 mg/l
Turbiedad final	=	1,74 UNT

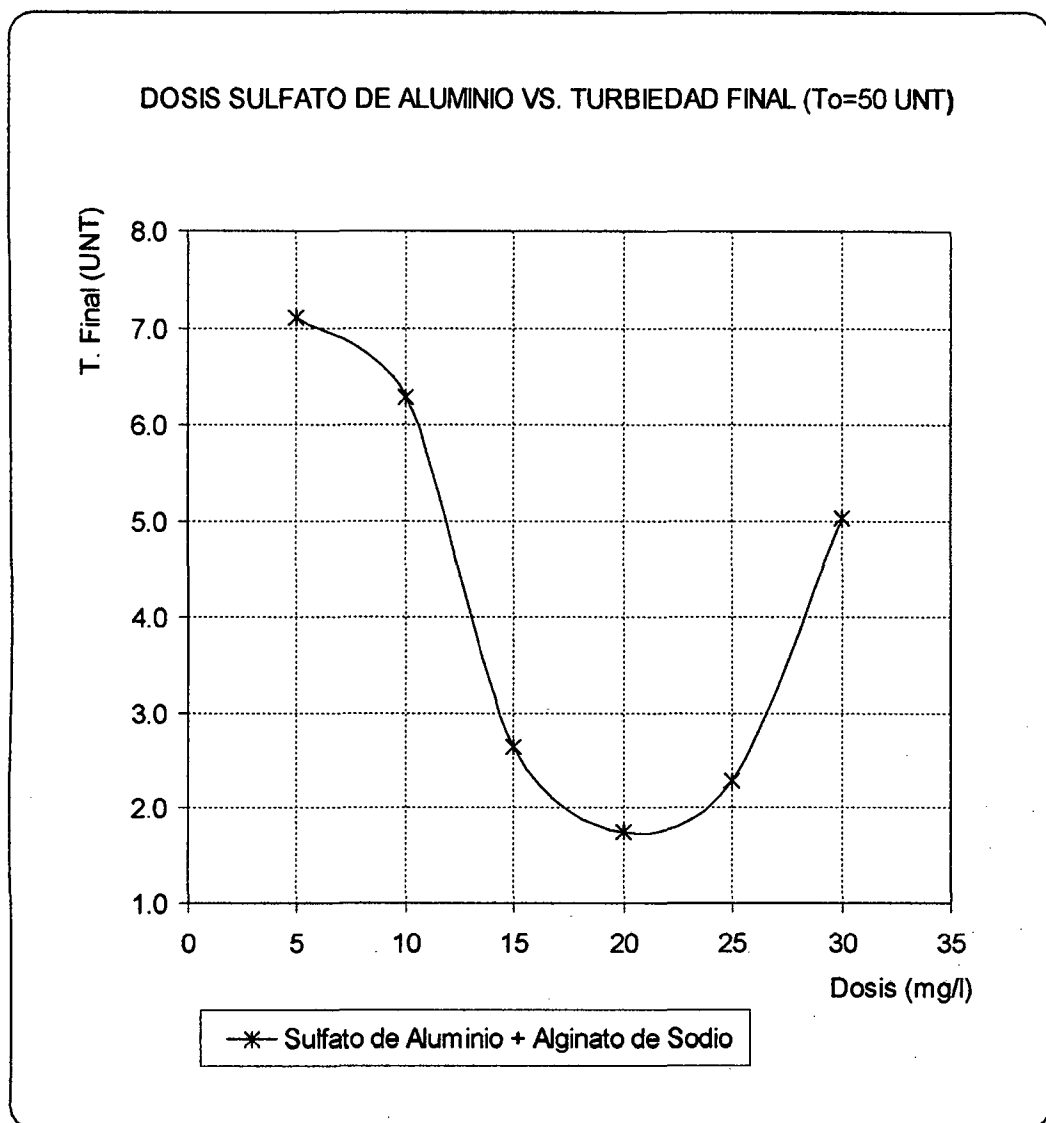


Figura 10.20 Dosis óptima del sulfato de aluminio como coagulante para turbiedad inicial 50 UNT

### 10.4.3 RESULTADO DE LA CONCENTRACIÓN ÓPTIMA DEL ALGINATO DE SODIO COMO AYUDANTE DE COAGULACIÓN

#### Características del agua

PH	= 7,930	Alcalinidad total	= 101 mg/l CaCO <sub>3</sub>
Temperatura	= 18,1 °C	Dureza total	= 292 mg/l CaCO <sub>3</sub>
To	= 50 UNT		

#### Reactivos

##### Sulfato de aluminio

Dosis óptima	= 20 mg/l
Concentración óptima	= 1 %
Volumen	= 4,0 ml

##### Alginato de sodio

Dosis óptima	= 30 mg/l
Concentración	= Variable

#### Mezcla rápida

V	= 300 RPM
T	= 5 seg.
G	= 770 s <sup>-1</sup>

#### Mezcla lenta

V	= 40 RPM
T	= 20 min.
G	= 40 s <sup>-1</sup>

#### Decantación

T	= 10 min.
h	= 6 cm.

Cuadro 26 Concentración óptima del alginato de sodio para turbiedad inicial de 50 UNT

Jarra	Dosis alginato de sodio (mg/l)	Concentración alginato de sodio (%)	Volumen alginato de Sodio (ml)	Turbiedad final (UNT)
1	30	0,2	30,0	1,52
2	30	0,4	15,0	1,34
3	30	0,6	10,0	1,27
4	30	0,8	7,5	0,86
5	30	1,0	6,0	1,50
6	30	1,2	5,0	2,69

Por lo tanto:

Turbiedad Inicial	=	50 UNT
Dosis óptima sulfato de aluminio	=	20 mg/l
Dosis óptima alginato de sodio	=	30 mg/l
Concentración óptima del alginato de sodio	=	0,8%
Turbiedad final	=	0,86 UNT

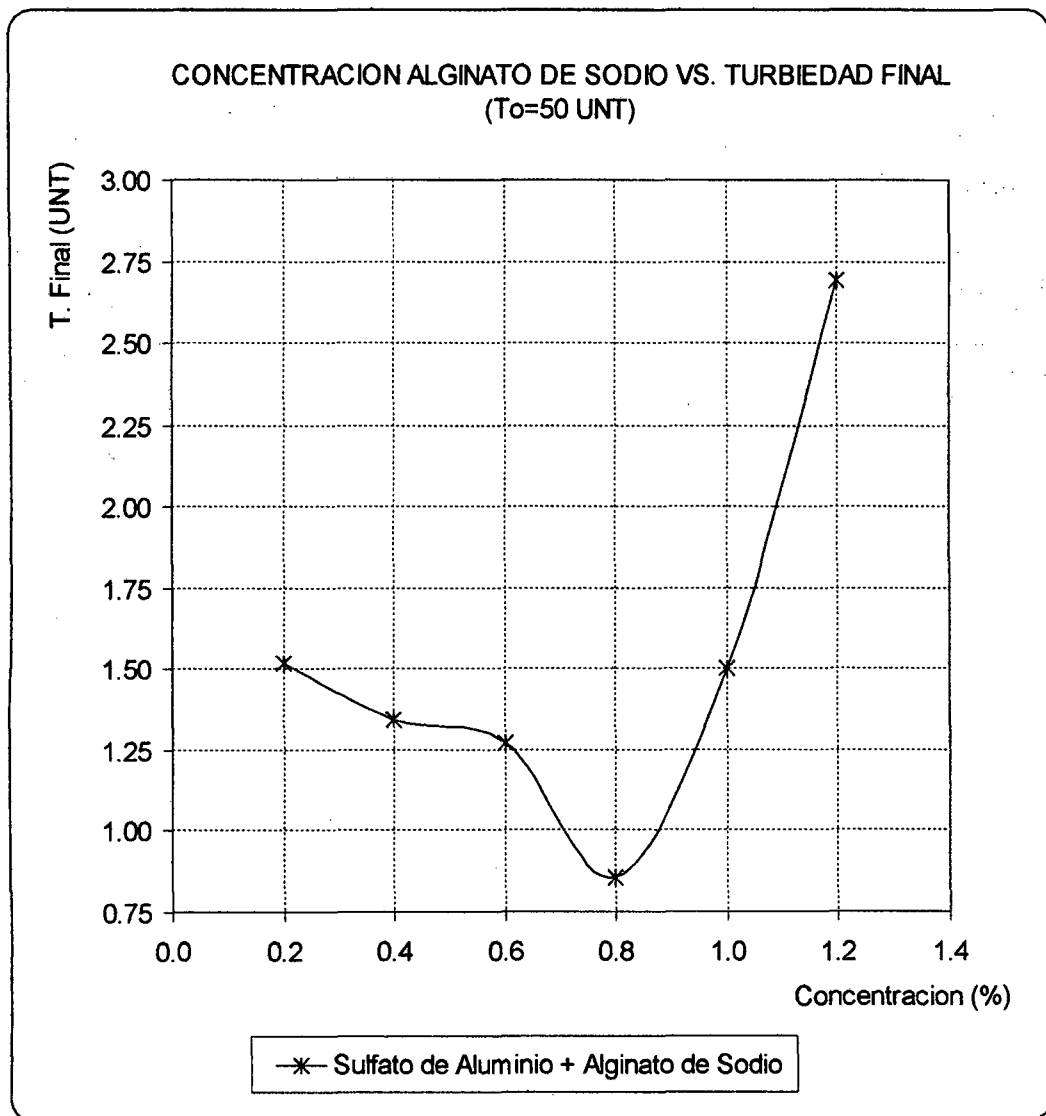


Figura 10.21 Concentración óptima del alginato de sodio como ayudante de coagulación. Turbiedad inicial 50 UNT

**10.4.4 RESULTADO DE PARÁMETROS DE FLOCULACIÓN PARA EL SULFATO DE ALUMINIO Y ALGINATO DE SODIO**

Características del agua

PH = 7,930                      Alcalinidad total = 101 mg/l CaCO<sub>3</sub>  
 Temperatura = 18,1 °C                      Dureza total = 292 mg/l CaCO<sub>3</sub>  
 To = 50 UNT

Mezcla rápida

Decantación

Velocidad = 300 RPM                      Tiempo = 10 min.  
 Tiempo = 5 seg.                      h = 6 cm.  
 Gradiente de velocidad = 770 s<sup>-1</sup>

Reactivos	Dosis óptima (mg/l)	Concentración óptima (%)	Volumen (ml)
Alginato de sodio	30	0,8	7,5
Sulfato de aluminio	20	1,0	4,0

**Cuadro 27 Parámetros de floculación del sulfato de aluminio y alginato de sodio para turbiedad inicial de 50 UNT**

Tiempo (minutos)	Gradientes de velocidad (s <sup>-1</sup> )			
	80	60	40	20
5	10,43	10,73	16,30	35,00
10	3,54	2,90	5,28	14,30
15	2,31	1,17	3,46	6,25
20	1,70	0,94	1,69	5,51
25	1,06	0,96	1,20	3,30
30	2,50	0,86	0,90	2,96

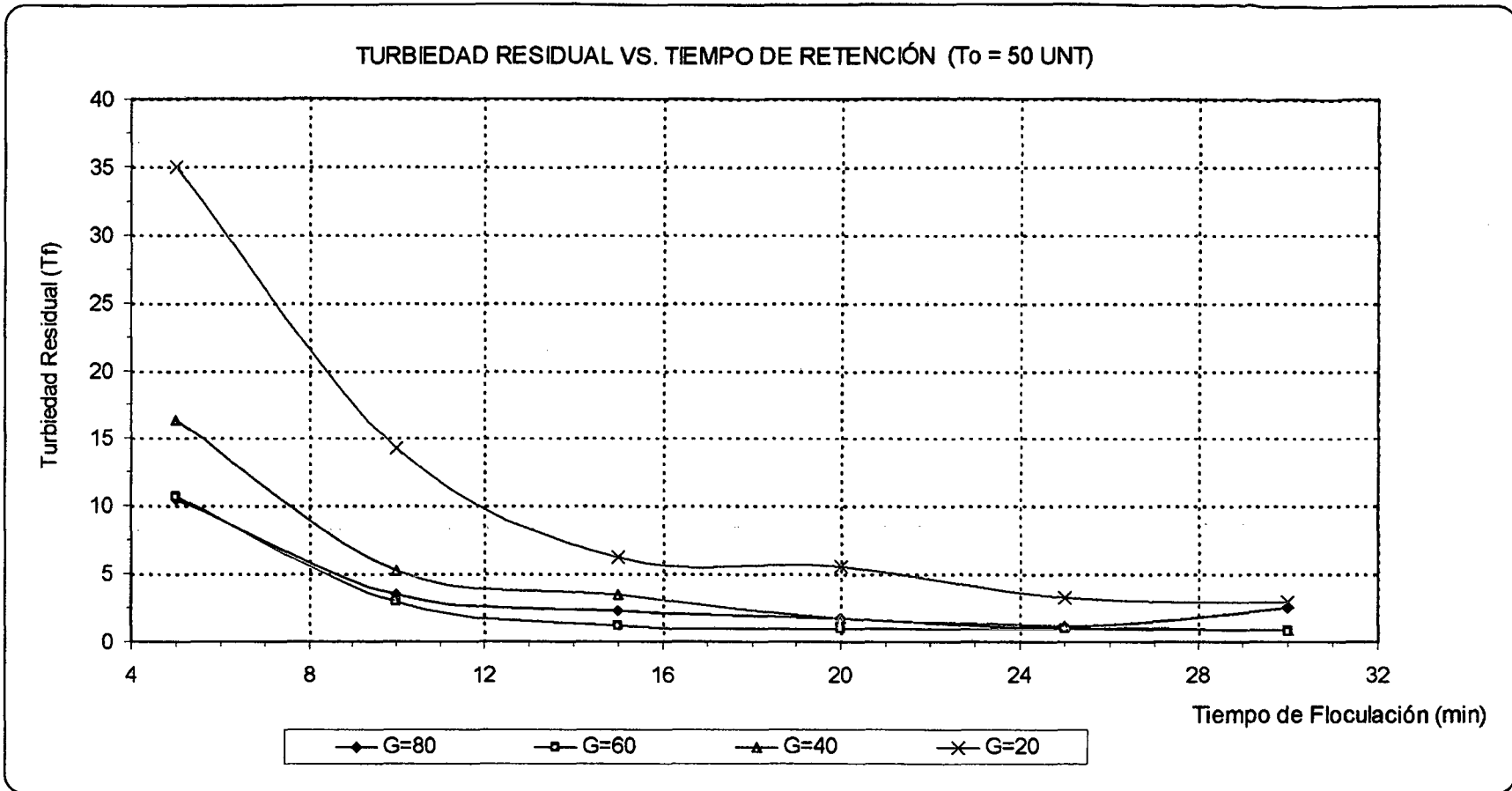


Figura 10.22 Determinación del tiempo óptimo de duración de la mezcla lenta para las diferentes gradientes de velocidad.

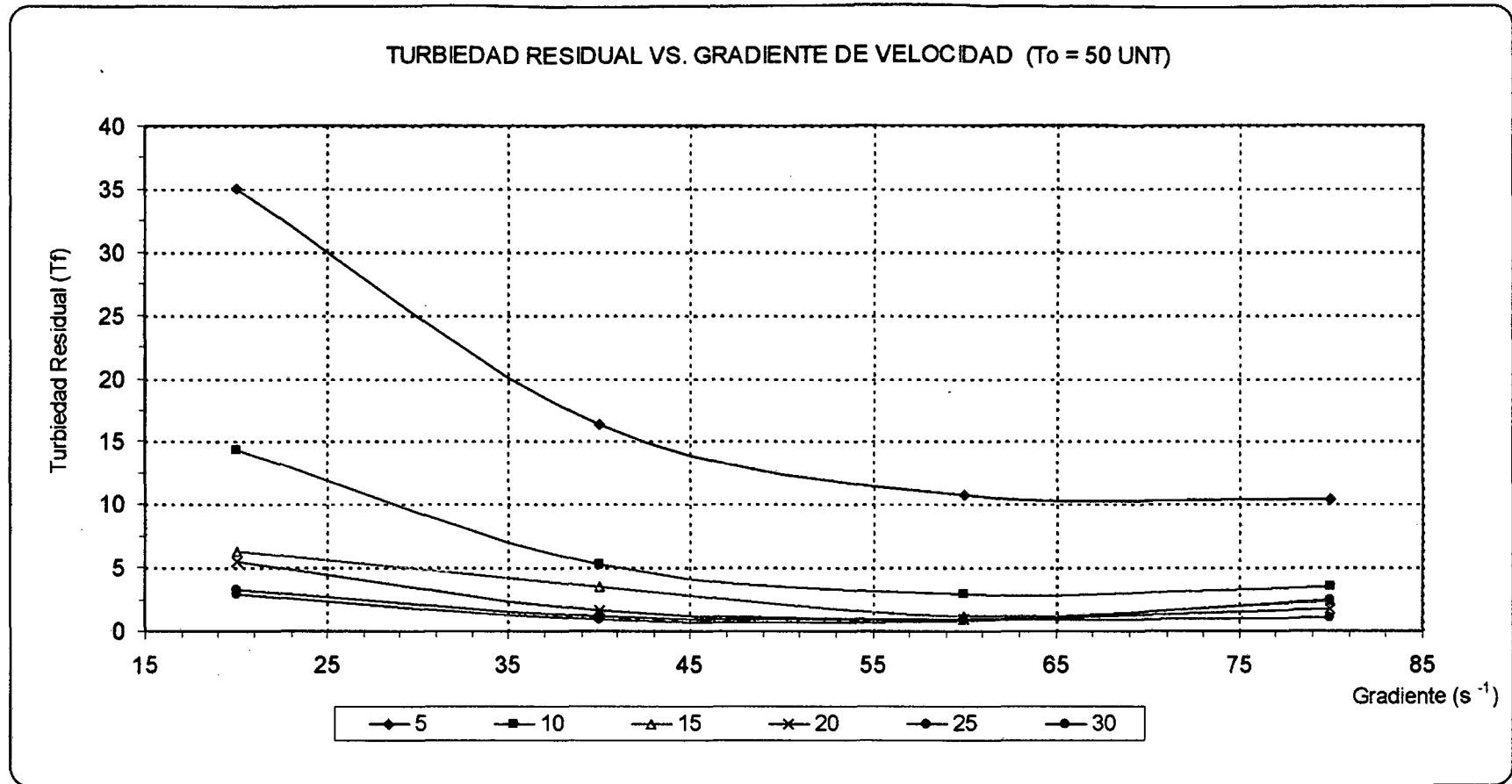


Figura 10.23 Determinación de las gradientes de velocidad para los diferentes tiempos de mezcla lenta.



De la figura 10.22 "Turbiedad residual vs Tiempo de retención" se puede observar que el tiempo óptimo es 20 minutos en donde se obtuvo una turbiedad final de 0,94 UNT.

De la figura 10.23 "Turbiedad residual vs Gradiente de velocidad" se obtuvieron los siguientes valores óptimos:

Punto	1	2	3	4	5	6
t (min)	5	10	15	20	25	30
G (s-1)	80	63	62	58	50	50

Se tendrá la ecuación de la recta:

$$Y = a + bX$$

Donde:  $\text{Log } G = Y$

$\text{Log } T = X$

Entonces se obtiene:

$$\text{Log } G = a + b \text{Log } T$$

Por mínimos cuadrados obtenemos los siguientes valores:

X	Y	XY	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>
LogT	LogG	LogT.LogG	LogT <sup>2</sup>	LogG <sup>2</sup>
0,70	1,90	1,33	0,49	3,62
1,00	1,80	1,80	1,00	3,24
1,18	1,79	2,11	1,38	3,21
1,30	1,76	2,29	1,69	3,11
1,40	1,70	2,38	1,95	2,89
1,48	1,70	2,51	2,18	2,89
Σ	7,05	12,42	8,70	18,95

$$\sum_{i=1}^n Y_i = an + b \sum_{i=1}^n X_i$$

$$\sum_{i=1}^n Y_i X_i = a \sum_{i=1}^n X_i + b \sum_{i=1}^n X_i^2$$

Resolviendo se obtienen los siguientes valores:

$$a = 2,08$$

$$b = -0,26$$

$$r = -0,97$$

$$r^2 = 0,95$$

Reemplazando:

$$\text{Log } G = 2,078548 - 0,257418 \text{ Log } T$$

Reagrupando y aplicando antilogaritmos se encuentra la siguiente ecuación:

$$G^n T = K$$

$$n = 3,884726$$

$$k = 8,074589$$

Teniendo los valores de n y k hallamos la ecuación de la gradiente de velocidad para una turbiedad inicial de 50 UNT:

$$G^{3,884726} T = 8,074589$$

Se halló que el tiempo total para la mezcla lenta es 20 minutos, con este tiempo hallamos las diferentes gradientes de velocidad que sirvieron de base para la floculación.

Teniendo en cuenta que la mezcla lenta se desarrolló en tres etapas para un tiempo total de 20 minutos se hallaron los siguientes valores:

Tiempo parcial (min)	7	7	6
Tiempo acumulado (min)	7	14	20
Gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ )	73	61	55
Velocidad (RPM)	49	44	42

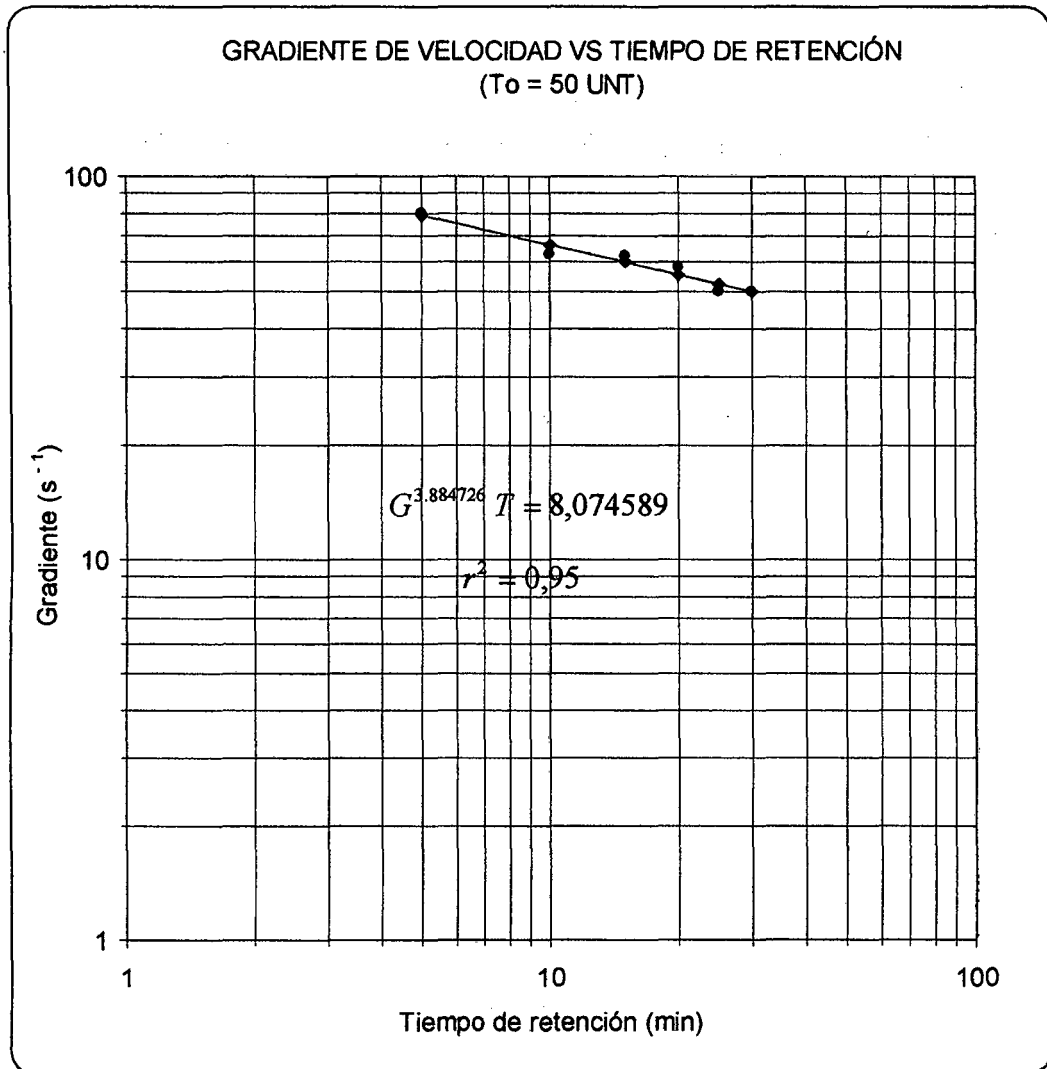


Figura 10.24 Recta de gradiente de velocidad para los diferentes tiempos de mezcla lenta.

**10.4.5 RESULTADO DE LOS PARÁMETROS DE DECANTACIÓN  
PARA EL SULFATO DE ALUMINIO Y ALGINATO DE SODIO  
TURBIEDAD INICIAL DE 50 UNT**

Características del agua

PH	=	7,930	Alcalinidad total	=	101 mg/l CaCO <sub>3</sub>
Temperatura	=	18,1 °C	Dureza total	=	292 mg/l CaCO <sub>3</sub>
To	=	50 UNT			

Valores óptimos	Dosis	Concentración	Volumen
Alginato de sodio	30 mg/l	0,8 %	7,5 ml
Sulfato de aluminio	20 mg/l	1,0 %	4,0 ml

Mezcla rápida

Velocidad	=	300 RPM
Tiempo	=	5 seg.
Gradiente de velocidad	=	770 s <sup>-1</sup>

Mezcla lenta

Tiempo parcial (min)	8	8	9
Gradiente de velocidad (s <sup>-1</sup> )	68	53	45
Velocidad (RPM)	49	41	37

**Cuadro 28 Determinación de la velocidad óptima de decantación del alginato de sodio como ayudante de coagulación**

Jarra	Tiempo (minutos)	Vel. decantación Vs (cm/s)	Turbiedad final Tf (UNT)	Fracción remanente (Co)
1	1	0,100	74,10	0,371
2	2	0,050	62,00	0,310
3	3	0,033	35,10	0,176
4	4	0,025	21,40	0,107
5	5	0,020	14,00	0,070
6	10	0,010	10,80	0,054

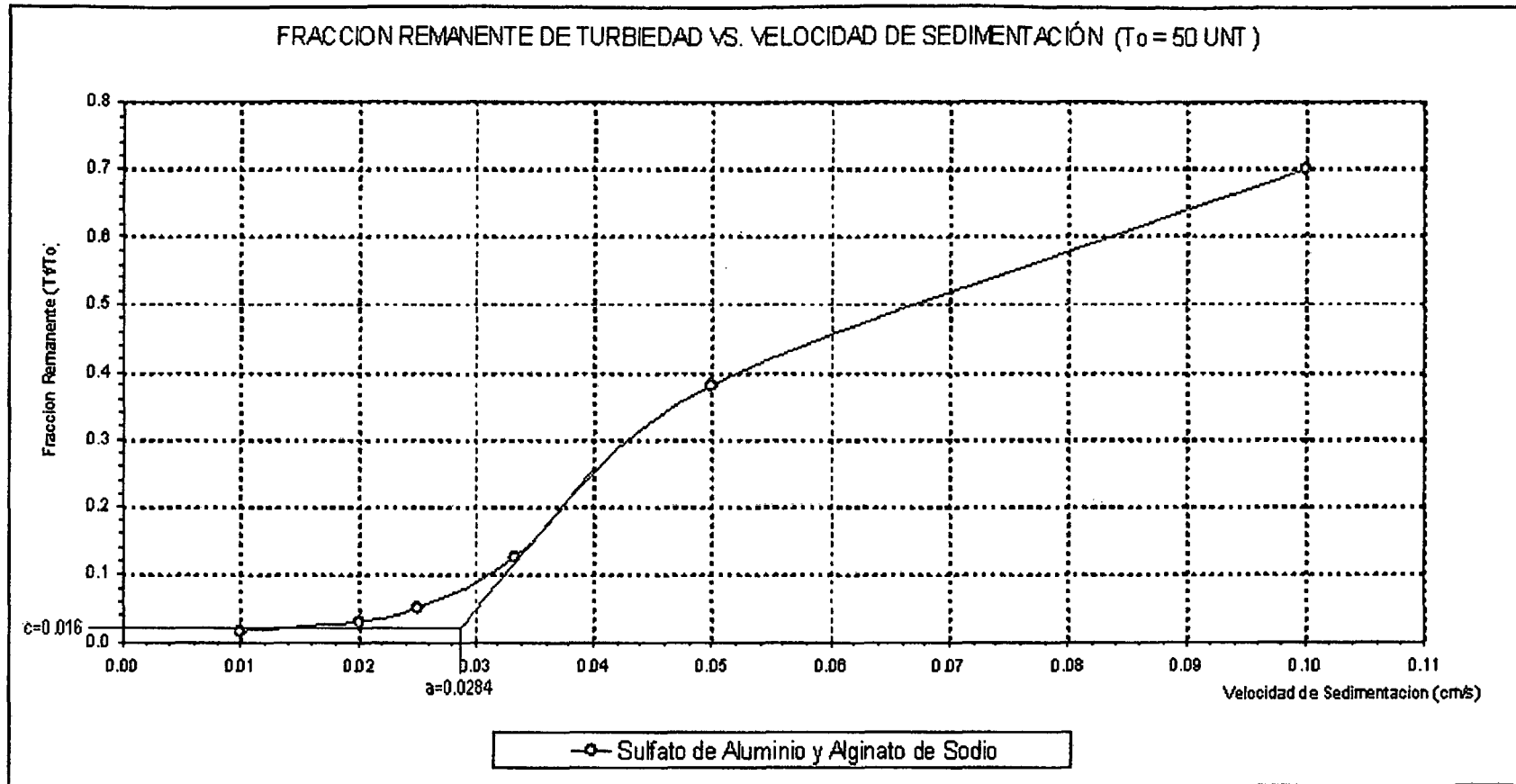


Figura 10.25 Determinación de la velocidad óptima de decantación para el alginato de sodio como ayudante de coagulación

Determinación de la remoción total, basada en el criterio de selección de la tasa de decantación (q), según la fórmula siguiente:

$$R_t = [1 - (C_o - C_f)] + \left( \frac{a + V_s}{2V_s} \right) (C_o + C_f)$$

Donde: T : Tiempo de decantación  
 Vs : Velocidad de decantación  
 To : Turbiedad inicial = 50 UNT  
 Tf : Turbiedad final  
 Tr : Turbiedad removida  
 Co=Tf / To : Fracción remanente de turbiedad

De la figura anterior podemos encontrar los siguientes valores iniciales:

$$a = 0,0284 \qquad C_f = 0,016$$

Con estos valores podremos hallar la tasa de decantación adecuada

Cuadro 29 Selección de la tasa de decantación del  $Al_2(SO_4)_3$  para una turbiedad inicial de 50 UNT

q (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d)	Vs (cm/s)	Co=Tf/To	1-(Co-Cf)	R <sub>t</sub>	Tr	Tf
31	0,0359	0,164	0,852	0,9845	49,224	0,776
32	0,0370	0,187	0,829	0,9800	48,998	1,002
33	0,0382	0,209	0,807	0,9751	48,756	1,244
34	0,0394	0,242	0,774	0,9684	48,420	1,580
35	0,0405	0,263	0,754	0,9630	48,152	1,848
35,5	0,0411	0,274	0,742	0,9600	48,000	2,000
36	0,0417	0,282	0,734	0,9575	47,876	2,124

Del cuadro seleccionamos la tasa de decantación:

$$q = 35,5 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$$

Con la que obtenemos: Tf = 2,00 UNT, ya que se cumple: Tf ≤ 2UNT.

### 10.5 RESULTADO DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DEL SULFATO DE ALUMINIO Y ALGINATO DE SODIO PARA UNA TURBIEDAD INICIAL DE 200 UNT

En el presente ítem se mostrará los resultados obtenidos de los parámetros óptimos de diseño que son: la dosis óptima, concentración óptima, tiempo óptimo de floculación y velocidad de decantación utilizando el sulfato de aluminio como coagulante y el alginato de sodio como ayudante de coagulación para la remoción de la turbiedad en un agua artificial de 200 UNT.

#### 10.5.1 RESULTADO DE DOSIS ÓPTIMA DEL ALGINATO DE SODIO COMO AYUDANTE DE COAGULACIÓN

<u>Características del agua</u>		<u>Reactivos</u>	
Turbiedad inicial	= 200 UNT	Sulfato de aluminio	
PH	= 7,930	Concentración	= 1 %
Temperatura	= 18,1 °C	Alginato de sodio	
Alcalinidad total	= 101 mg/l CaCO <sub>3</sub>	Concentración	= 1 %
Dureza total	= 292 mg/l CaCO <sub>3</sub>	Inicial	

<u>Mezcla rápida</u>		<u>Mezcla lenta</u>		<u>Decantación</u>	
V	= 300 RPM	V	= 40 RPM	T	= 10 min.
T	= 5 seg.	T	= 20 min.	h	= 6 cm.
G	= 770 s <sup>-1</sup>	G	= 40 s <sup>-1</sup>		

Cuadro 30 Dosis óptima del alginato de sodio como ayudante de coagulación para turbiedad inicial de 200 UNT

Jarra	Dosis (mg/l)		Volumen (ml)		Turbiedad final (UNT)
	Sulfato de aluminio	Alginato de sodio	Sulfato de aluminio	Alginato de sodio	
1	10	15	2,0	3	7,72
2	10	20	2,0	4	7,11
3	10	25	2,0	5	6,27
4	10	30	2,0	6	3,32
5	10	35	2,0	7	4,76
6	10	40	2,0	8	5,19

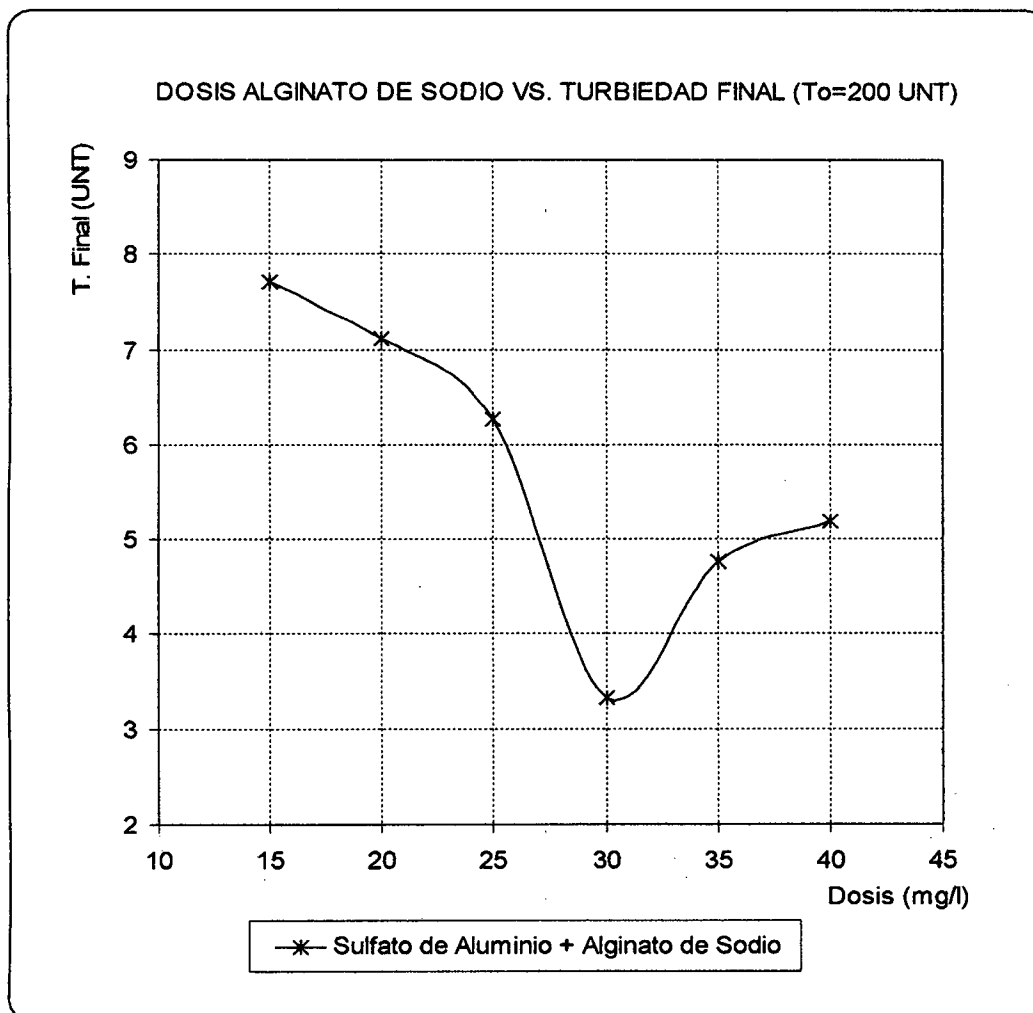


Figura 10.26 Dosis óptima del alginato de sodio como ayudante de coagulación para turbiedad inicial 200 UNT



### 10.5.2 RESULTADO DE DOSIS ÓPTIMA DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE

<u>Características del agua</u>		<u>Reactivos</u>	
Turbiedad inicial	= 200 UNT	Sulfato de aluminio	
PH	= 7,930	Concentración	= 1 %
Temperatura	= 18,1 °C	Alginato de sodio	
Alcalinidad total	= 101 mg/l CaCO <sub>3</sub>	Dosis óptima	= 30 mg/l
Dureza total	= 292 mg/l CaCO <sub>3</sub>	Concentración Inicial	= 1 %

<u>Mezcla rápida</u>		<u>Mezcla lenta</u>		<u>Decantación</u>	
V	= 300 RPM	V	= 40 RPM	T	= 10 min.
T	= 5 seg.	T	= 20 min.	h	= 6 cm.
G	= 770 s <sup>-1</sup>	G	= 40 s <sup>-1</sup>		

Cuadro 31 Dosis óptima del sulfato de aluminio para turbiedad inicial de 200 UNT

Jarra	Dosis (mg/l)		Volumen (ml)		Turbiedad final (UNT)
	Sulfato de aluminio	Alginato de sodio	Sulfato de aluminio	Alginato de sodio	
1	15	30	3,0	6,0	6,46
2	20	30	4,0	6,0	4,07
3	25	30	5,0	6,0	2,34
4	30	30	6,0	6,0	1,37
5	35	30	7,0	6,0	2,03
6	40	30	8,0	6,0	2,43

Por lo tanto:

Turbiedad Inicial	=	200 UNT
Dosis óptima sulfato de aluminio	=	30 mg/l
Dosis óptima alginato de sodio	=	30 mg/l
Turbiedad final	=	1,37 UNT

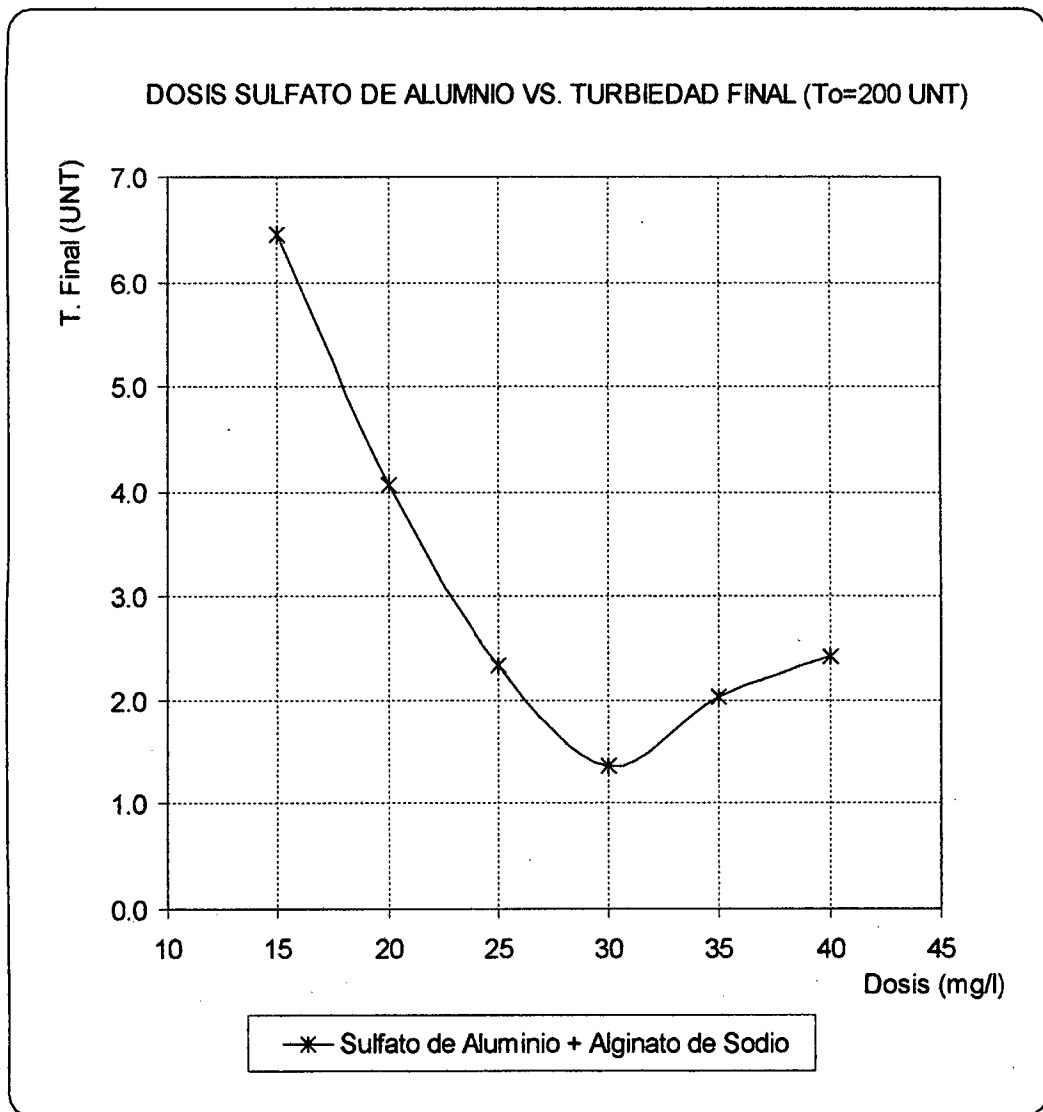


Figura 10.27 Dosis óptima del sulfato de aluminio como coagulante para turbiedad inicial 200 UNT

### 10.5.3 RESULTADO DE LA CONCENTRACIÓN ÓPTIMA DEL ALGINATO DE SODIO COMO AYUDANTE DE COAGULACIÓN

#### Características del agua

PH	=	7,930	Alcalinidad total	=	101 mg/l CaCO <sub>3</sub>
Temperatura	=	18,1 °C	Dureza total	=	292 mg/l CaCO <sub>3</sub>
To	=	200 UNT			

#### Reactivos

##### Sulfato de aluminio

Dosis óptima	=	30 mg/l
Concentración óptima	=	1 %
Volumen	=	6,0 ml

##### Alginato de sodio

Dosis óptima	=	30 mg/l
Concentración	=	Variable

#### Mezcla rápida

V	=	300 RPM
T	=	5 seg.
G	=	770 s <sup>-1</sup>

#### Mezcla lenta

V	=	40 RPM
T	=	20 min.
G	=	52 s <sup>-1</sup>

#### Decantación

T	=	10 min.
h	=	6 cm.

Cuadro 32 Concentración óptima del alginato de sodio como ayudante de coagulación para turbiedad inicial 200 UNT

Jarra	Dosis alginato de sodio (mg/l)	Concentración alginato de sodio (%)	Volumen alginato de sodio (ml)	Turbiedad final (UNT)
1	30	0,2	30,0	2,29
2	30	0,3	20,0	1,91
3	30	0,4	15,0	1,54
4	30	0,5	12,0	1,88
5	30	0,6	10,0	2,40
6	30	0,7	8,6	2,60

Por lo tanto:

Turbiedad Inicial	=	200 UNT
Dosis óptima sulfato de aluminio	=	30 mg/l
Dosis óptima alginato de sodio	=	30 mg/l
Concentración óptima del alginato de sodio	=	0,4%
Turbiedad final	=	1,54 UNT

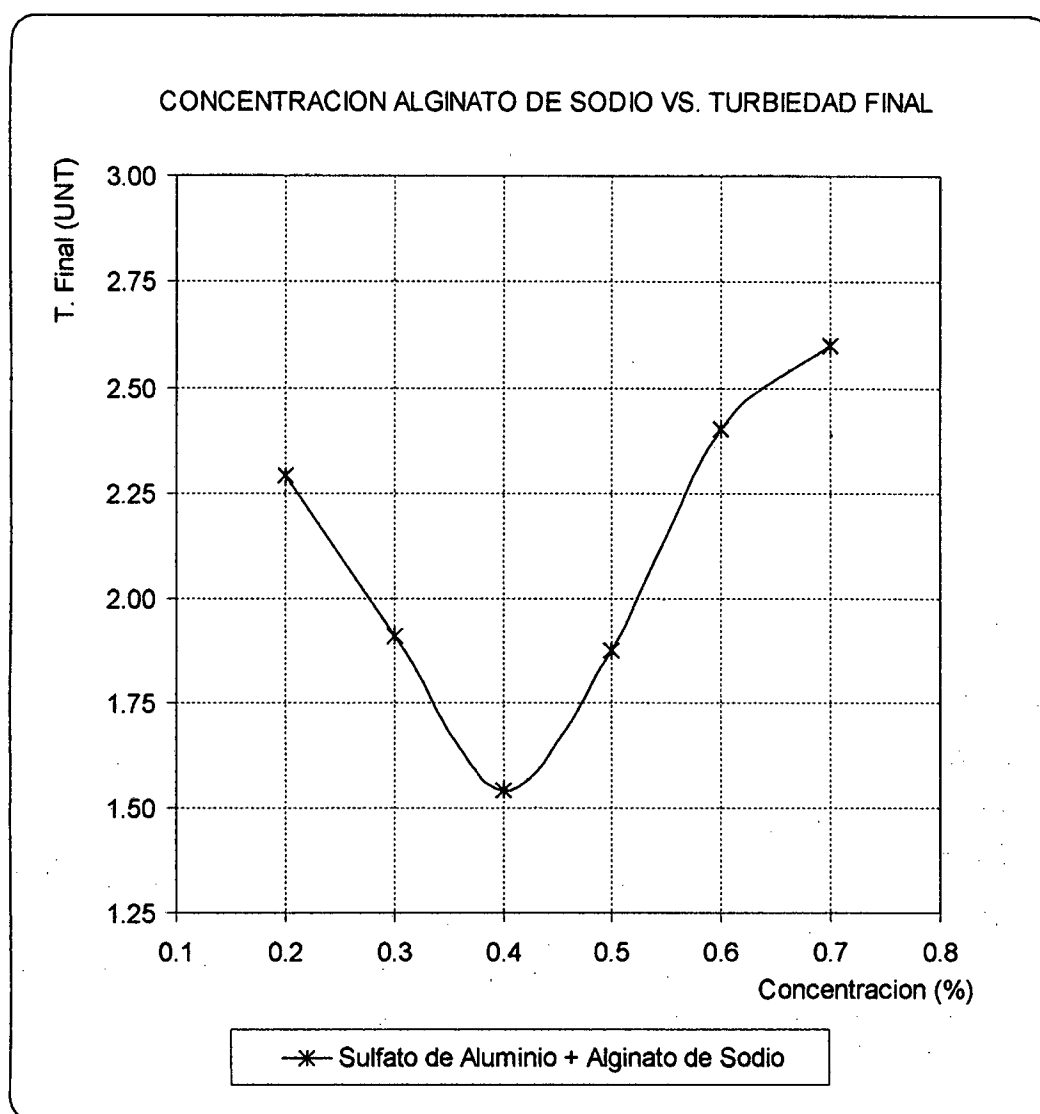


Figura 10.28 Concentración óptima del alginato de sodio como ayudante de coagulación. Turbiedad inicial 200 UNT

**10.5.4 RESULTADO DE PARÁMETROS DE FLOCULACIÓN PARA EL SULFATO DE ALUMINIO Y ALGINATO DE SODIO**

Características del agua

PH	=	7,930	Alcalinidad total	=	101 mg/l CaCO <sub>3</sub>
Temperatura	=	18,1 °C	Dureza total	=	292 mg/l CaCO <sub>3</sub>
To	=	200 UNT			

Mezcla rápida

Velocidad	=	300 RPM
Tiempo	=	5 seg.
Gradiente de velocidad	=	770 s <sup>-1</sup>

Decantación

Tiempo	=	10 min.
h	=	6 cm.

	Dosis (mg/l)	Concentración óptima (%)	Volumen (ml)
Alginato de sodio	30	0,4	15,0
Sulfato de aluminio	30	1,0	6,0

**Cuadro 33 Parámetros de floculación del sulfato de aluminio y alginato de sodio para turbiedad inicial de 200 UNT**

Tiempo (minutos)	Gradientes de velocidad (s <sup>-1</sup> )			
	80	60	40	20
5	7,53	13,70	24,80	55,00
10	3,35	3,60	9,39	23,70
15	2,27	2,33	4,72	12,90
20	1,28	1,48	4,43	6,73
25	3,18	2,70	3,14	5,61
30	3,68	0,84	1,43	4,90

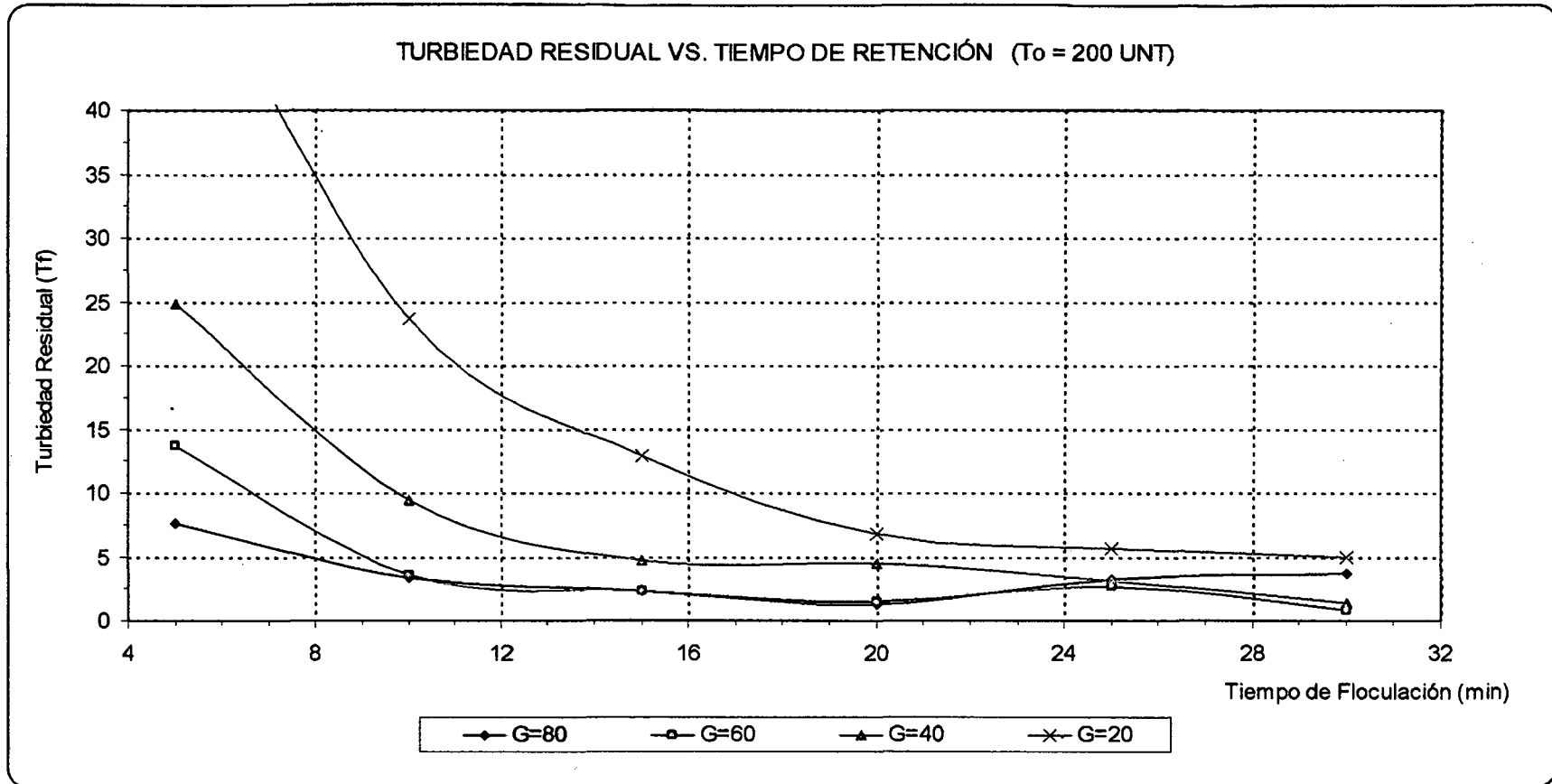


Figura 10.29 Determinación del tiempo óptimo de duración de la mezcla lenta para las diferentes gradientes de velocidad.

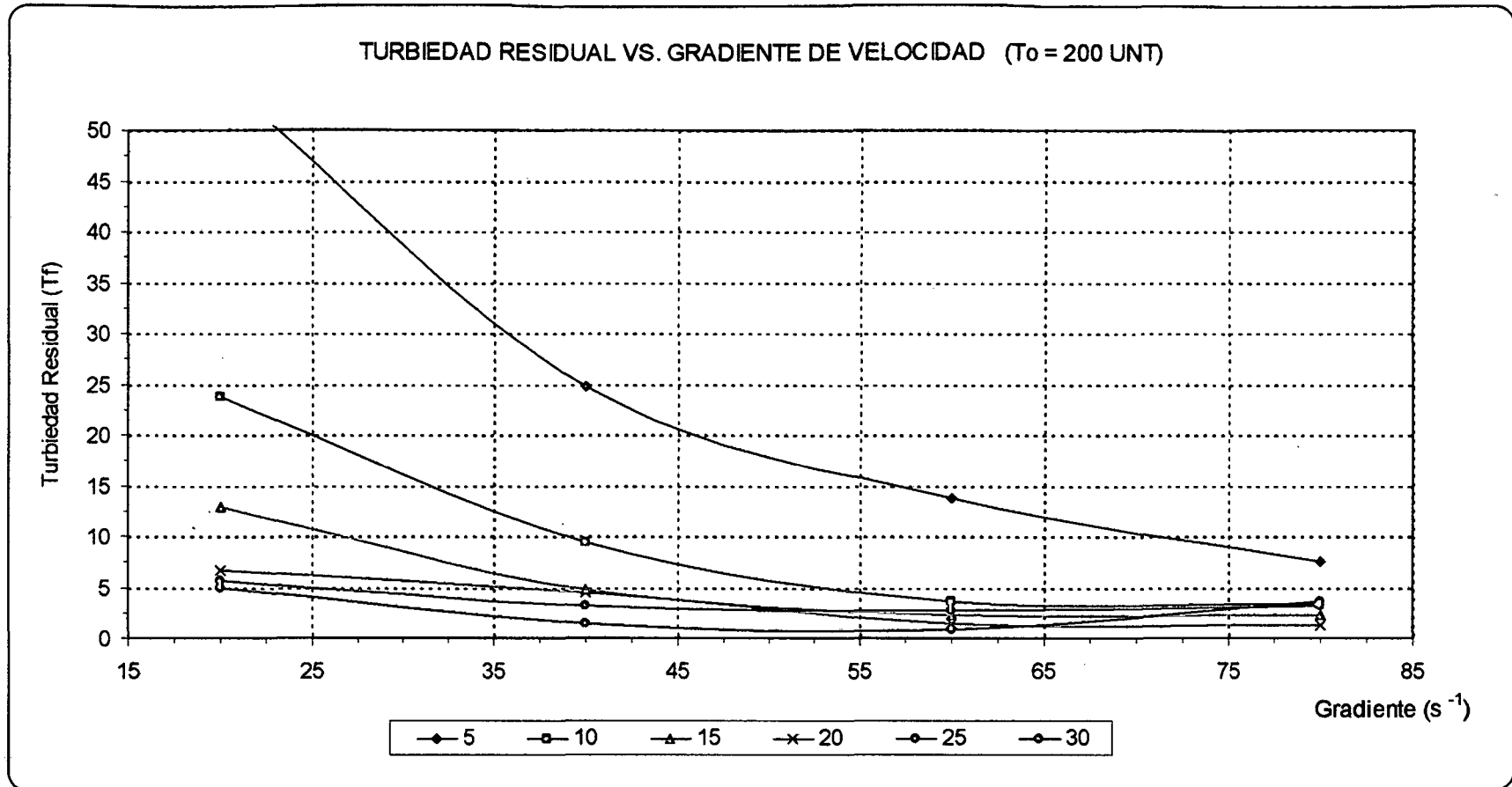


Figura 10.30 Determinación de las gradientes de velocidad para los diferentes tiempos de mezcla lenta.

De la figura 10.29 "Turbiedad residual vs Tiempo de retención" se puede observar que el tiempo óptimo es 20 minutos en donde se obtuvo una turbiedad final de 1,28 UNT.

De la figura 10.30 "Turbiedad residual vs Gradiente de velocidad" se obtuvieron los siguientes valores óptimos:

Punto	1	2	3	4	5	6
t (min)	5	10	15	20	25	30
G (s-1)	80	68	65	65	55	54

Se tendrá la ecuación de la recta:

$$Y = a + bX$$

Donde:

$$\text{Log } G = Y$$

$$\text{Log } T = X$$

Entonces se obtiene:

$$\text{Log } G = a + b \text{Log } T$$

Por mínimos cuadrados obtenemos los siguientes valores:

X	Y	XY	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>
LogT	LogG	LogT.LogG	LogT <sup>2</sup>	LogG <sup>2</sup>
0,70	1,90	1,33	0,49	3,62
1,00	1,83	1,83	1,00	3,36
1,18	1,81	2,13	1,38	3,29
1,30	1,81	2,36	1,69	3,29
1,40	1,74	2,43	1,95	3,03
1,48	1,73	2,56	2,18	3,00
Σ	7,05	10,83	8,70	19,58



$$\sum_{i=1}^n Y_i = an + b \sum_{i=1}^n X_i$$

$$\sum_{i=1}^n Y_i X_i = a \sum_{i=1}^n X_i + b \sum_{i=1}^n X_i^2$$

Resolviendo se obtienen los siguientes valores:

$$a = 2,05$$

$$b = -0,21$$

$$r = -0,95$$

$$r^2 = 0,91$$

Reemplazando:

$$\text{Log } G = 2,052173 - 0,2097323 \text{ Log } T$$

Reagrupando y aplicando antilogaritmos se encuentra la siguiente ecuación:

$$G^n T = K$$

$$n = 4,767982$$

$$k = 9,874723$$

Teniendo los valores de n y k hallamos la ecuación de la gradiente de velocidad para una turbiedad inicial de 200 UNT:

$$G^{4,767982} T = 9,874723$$

Se halló que el tiempo total para la mezcla lenta es 20 minutos, con este tiempo hallamos las diferentes gradientes de velocidad que sirvieron de base para la floculación.

Teniendo en cuenta que la mezcla lenta se desarrolló en tres etapas para un tiempo total de 20 minutos se hallaron los siguientes valores:

Tiempo parcial (min)	7	7	6
Tiempo acumulado (min)	7	14	20
Gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ )	75	65	60
Velocidad (RPM)	54	49	45

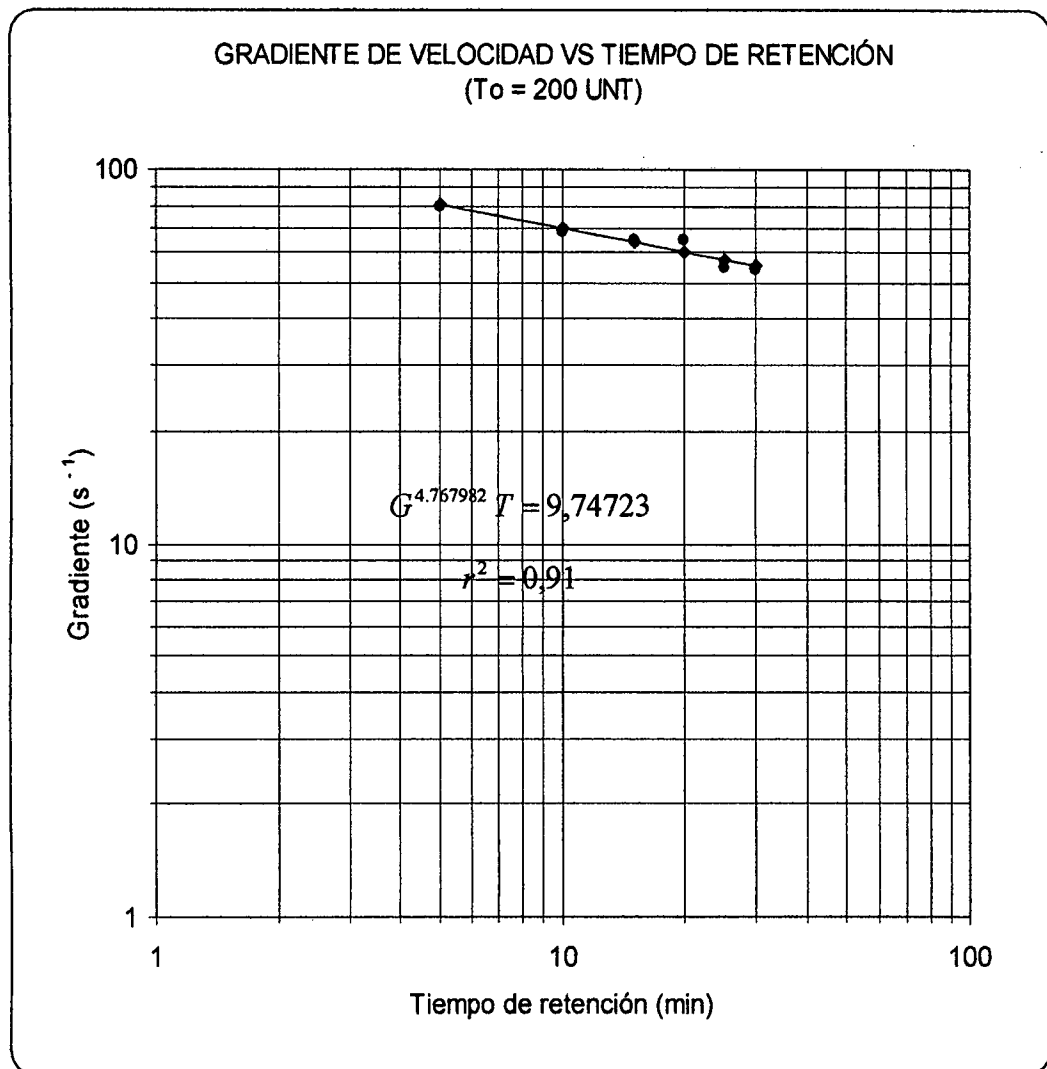


Figura 10.31 Recta de gradiente de velocidad para los diferentes tiempos de mezcla lenta

**10.5.5 RESULTADO DE LOS PARÁMETROS DE SEDIMENTACIÓN PARA EL SULFATO DE ALUMINIO Y ALGINATO DE SODIO PARA TURBIEDAD INICIAL DE 200 UNT**

Características del agua

PH	=	7,930	Alcalinidad total	=	101 mg/l CaCO <sub>3</sub>
Temperatura	=	18,1 °C	Dureza total	=	292 mg/l CaCO <sub>3</sub>
To	=	200 UNT			

Valores óptimos	Dosis	Concentración	Volumen
Alginato de sodio	30 mg/l	0,4 %	15,0 ml
Sulfato de aluminio	30 mg/l	1,0 %	6,0 ml

Mezcla rápida

Velocidad	=	300 RPM
Tiempo	=	5 seg.
Gradiente de velocidad	=	770 s <sup>-1</sup>

Mezcla lenta

Tiempo parcial (min)	7	7	6
Gradiente de velocidad (s <sup>-1</sup> )	75	65	61
Velocidad (RPM)	54	49	45

**Cuadro 34** Determinación de la velocidad óptima de decantación del Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>

Jarra	Tiempo (minutos)	Vel. decantación Vs (cm/s)	Turbiedad final Tf (UNT)	Fracción remanente (Co)
1	1	0,100	60,30	0,302
2	2	0,050	27,80	0,139
3	3	0,033	7,60	0,038
4	4	0,025	3,55	0,018
5	5	0,020	1,97	0,010
6	10	0,010	1,02	0,005

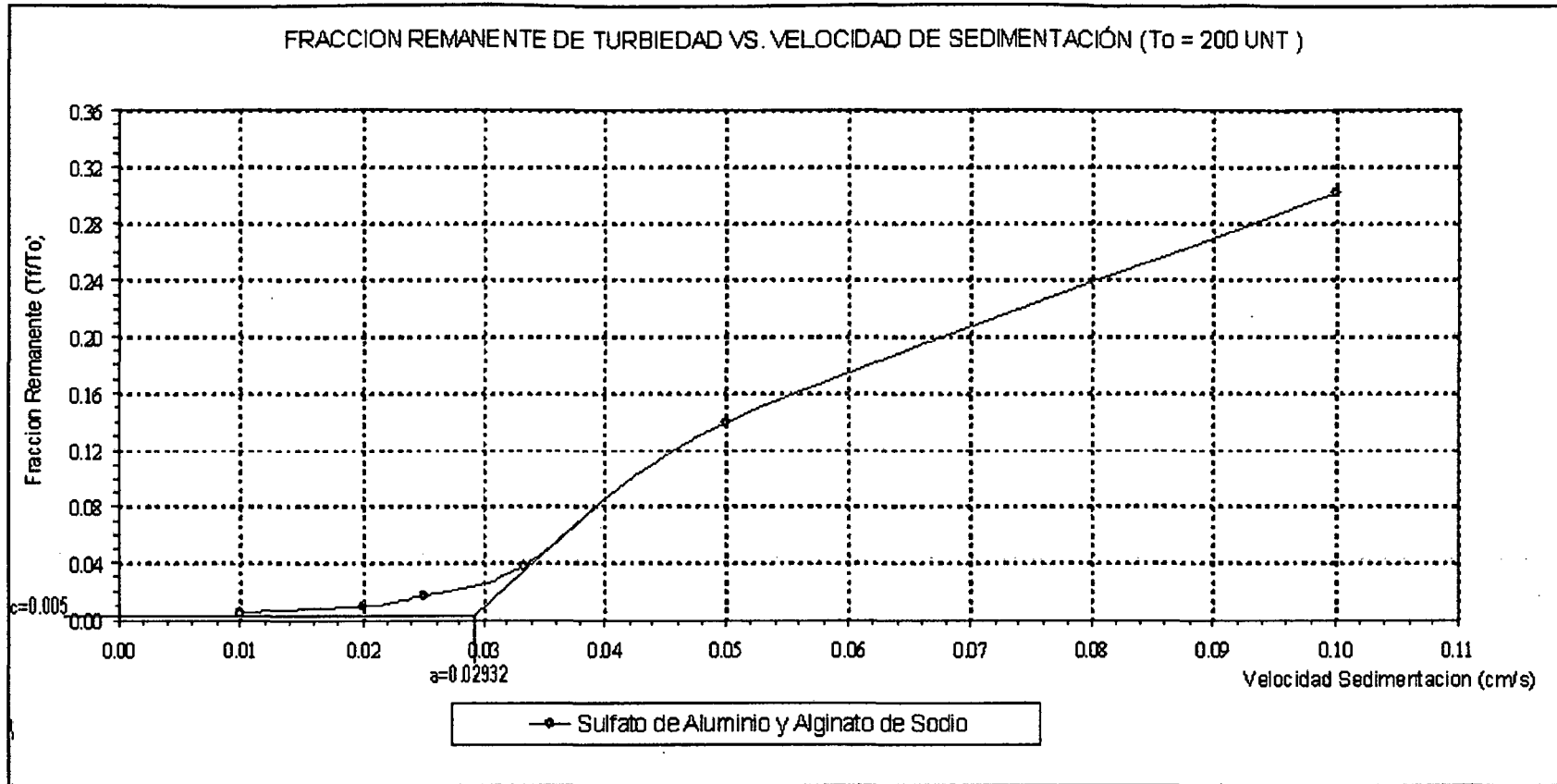


Figura 10.32 Determinación de la velocidad óptima de decantación del alginato de sodio como ayudante de coagulación

Determinación de la remoción total, basado en el criterio de selección de la tasa de decantación (q), según la fórmula siguiente:

$$R_t = [1 - (C_o - C_f)] + \left( \frac{a + V_s}{2V_s} \right) (C_o + C_f)$$

Donde:

- T : Tiempo de decantación  
 Vs : Velocidad de decantación  
 To : Turbiedad inicial = 200 UNT  
 Tf : Turbiedad final  
 Tr : Turbiedad removida

Co=Tf / To : Fracción remanente de turbiedad

De la figura anterior podemos encontrar los siguientes valores iniciales:

a = 0,02932                      Cf = 0,005

Con estos valores podremos hallar la tasa de decantación adecuada.

**Cuadro 35 Selección de la tasa de decantación del alginato de sodio como ayudante de coagulación para una turbiedad inicial de 200 UNT**

q (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d)	Vs (cm/s)	Co=Tf/To	1-(Co-Cf)	R <sub>t</sub>	Tr	Tf
30	0,0347	0,0479	0,957	0,9967	199,333	0,667
31	0,0359	0,0540	0,951	0,9955	199,104	0,896
32	0,0370	0,0630	0,942	0,9940	198,792	1,208
33	0,0382	0,0722	0,933	0,9922	198,439	1,561
34	0,0394	0,0815	0,924	0,9902	198,050	1,950
35	0,0405	0,0895	0,916	0,9883	197,666	2,334
36	0,0417	0,0957	0,909	0,9866	197,312	2,688

Del cuadro seleccionamos la tasa de decantación:

$$q = 34 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$$

Con la que obtenemos:  $T_f = 1,950 \text{ UNT}$ , ya que se cumple:  $T_f \leq 2 \text{ UNT}$ .

### 10.5.6 RESUMEN DE RESULTADOS

A continuación se presenta el resumen de los resultados obtenidos en el laboratorio para las muestras de agua con turbiedad 50 y 200 UNT, utilizando el sulfato de aluminio con y sin ayudante de coagulación.

Cuadro 36 Resumen de resultados utilizando el sulfato de aluminio con y sin ayudante de coagulación.

<b>TURBIEDAD</b>	<b>50 UNT</b>	<b>200 UNT</b>
<b>Empleando solo Sulfato de Aluminio</b>		
Dosis óptima:	20 mg/l Tf = 2,56UNT	30 mg/l Tf = 2,80 UNT
Concentración óptima:	1%	1%
Tiempo óptimo de floculación:	25 min.	25 min.
R <sup>2</sup> :	0,9	0,9
Fórmula para la gradiente:	$G^{4,27608927} \cdot T = 8,76704$	$G^{2,71343} \cdot T = 5,89569$
Tasa de decantación:	27 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d Tf = 1,986 UNT	22 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d Tf = 1,999 UNT
<b>Empleando Sulfato de Aluminio y Alginato de Sodio</b>		
Dosis óp. sulfato de aluminio:	20 mg/l	30 mg/l
Dosis óp. alginato de sodio:	30 mg/l	30 mg/l
	Tf = 1,74 UNT	Tf = 1,37 UNT
Conc. óp. sulfato de aluminio:	1%	1%
Conc. óp. alginato de sodio:	0,8%	0,4%
	Tf = 0,86 UNT	Tf = 1,54 UNT
Tiempo óptimo de floculación:	20 min.	20 min.
R <sup>2</sup> :	0,95	0,91
Fórmula para la gradiente:	$G^{3,884726} \cdot T = 8,07458$	$G^{4,767982} \cdot T = 9,87472$
Tasa de decantación:	35,5 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d Tf = 2,00 UNT	34,0 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d Tf = 1,950 UNT

## **CAPITULO 11. EVALUACION ECONOMICA**

Los costos que se están tomando en cuenta para la evaluación económica están referidos solamente a los insumos químicos a utilizarse en nuestra investigación, considerándose que los costos de otros parámetros (personal técnico, equipos del laboratorio, etc.) se mantienen constantes en la evaluación del sulfato de aluminio como coagulante primario y la utilización del alginato de sodio como ayudante de coagulación del sulfato de aluminio.

El precio del kilogramo de Sulfato de aluminio tipo B200 considerados en este trabajo se estableció, según el precio cotizado por la empresa Químicos Goicoechea S.R. Ltda., en S./ 1,5 por cada Kg, en su presentación de bolsas de 50Kg.

El precio del kilogramo de Alginato de sodio considerados en este trabajo se estableció, según la importadora A. Tarrillo Barba S.A. es de S./ 6,00 por cada Kg,

### **11.1 COSTO DE LOS INSUMOS QUÍMICOS PARA EL TRATAMIENTO EMPLEANDO SÓLO EL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE:**

#### **11.1.1 PARA LA MUESTRA DE AGUA CON TURBIEDAD DE 50 UNT**

A) La dosis de sulfato de aluminio para la turbiedad de 50 UNT es de:

$$D_{Al_2(SO_4)_3} = 20 \text{ mg / l}$$

Entonces el costo para tratar  $1000 \text{ m}^3$  de agua cuando se utiliza sólo sulfato de aluminio sería:

$$\text{Costo} = 20 \frac{\text{mg}}{\text{l}} * 1.50 \frac{\text{S/}}{\text{Kg.}}$$

$$\text{Costo} = 30 \frac{\text{S/}}{1000\text{m}^3}.$$

#### 11.1.2 PARA LA MUESTRA DE AGUA DE TURBIEDAD DE 200 UNT

A) La dosis de sulfato de aluminio para la turbiedad de 200 UNT es de:

$$D_{\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3} = 30 \text{mg/l}$$

Entonces el costo para tratar  $1000 \text{ m}^3$  de agua cuando se utiliza sólo sulfato de aluminio sería:

$$\text{Costo} = 30 \frac{\text{mg}}{\text{l}} * 1.50 \frac{\text{S/}}{\text{Kg.}}$$

$$\text{Costo} = 45 \frac{\text{S/}}{1000\text{m}^3}.$$

#### 11.2 COSTO DE LOS INSUMOS QUÍMICOS PARA EL TRATAMIENTO EMPLEANDO EL ALGINATO DE SODIO COMO AYUDANTE DE COAGULACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO.

##### 11.2.1 PARA LA MUESTRA DE AGUA CON TURBIEDAD DE 50 UNT

A) La dosis de sulfato de aluminio para la turbiedad de 50 UNT es de:

$$D_{\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3} = 20 \text{mg/l}$$



Entonces el costo para tratar 1000 m<sup>3</sup> de agua cuando se utiliza sólo Sulfato de aluminio sería:

$$\text{Costo} = 20 \frac{\text{mg}}{\text{l}} * 1.50 \frac{\text{S/}}{\text{Kg.}}$$

$$\text{Costo} = 30 \frac{\text{S/}}{1000\text{m}^3}.$$

B) La dosis de alginato de sodio para la turbiedad de 50 UNT es de:

$$D = 30 \text{mg/l}$$

Entonces el costo para tratar 1000 m<sup>3</sup> de agua cuando se utiliza sólo alginato de sodio sería:

$$\text{Costo} = 30 \frac{\text{mg}}{\text{l}} * 6.0 \frac{\text{S/}}{\text{Kg.}}$$

$$\text{Costo} = 180 \frac{\text{S/}}{1000\text{m}^3}.$$

Siendo el costo total para tratar 1000 m<sup>3</sup> de agua con turbiedad de 50 UNT:

$$\text{Costo} = 210 \frac{\text{S/}}{1000\text{m}^3}.$$

### 11.2.2 PARA LA MUESTRA DE AGUA DE TURBIEDAD DE 200 UNT

A) La dosis de sulfato de aluminio para la turbiedad de 200 UNT es de:

$$D_{\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3} = 30 \text{mg/l}$$

Entonces el costo para tratar 1000 m<sup>3</sup> de agua cuando se utiliza sólo sulfato de aluminio sería:

$$\text{Costo} = 30 \frac{\text{mg}}{\text{l}} * 1.50 \frac{\text{S/}}{\text{Kg.}}$$

$$\text{Costo} = 45 \frac{\text{S/}}{1000\text{m}^3}$$

B) La dosis de alginato de sodio para la turbiedad de 200 UNT es de:

$$D = 30 \text{mg/l}$$

Entonces el costo para tratar 1000 m<sup>3</sup> de agua cuando se utiliza sólo alginato de sodio sería:

$$\text{Costo} = 30 \frac{\text{mg}}{\text{l}} * 6.0 \frac{\text{S/}}{\text{Kg.}}$$

$$\text{Costo} = 180 \frac{\text{S/}}{1000\text{m}^3}$$

Siendo el costo total para tratar 1000 m<sup>3</sup> de agua con turbiedad de 50 UNT:

$$\text{Costo} = 225 \frac{\text{S/}}{1000\text{m}^3}$$

Cuadro 37 Resumen de evaluación económica.

TURBIEDAD INICIAL	ANÁLISIS	COSTO (S./1000m <sup>3</sup> )
50 UNT	Empleando solo sulfato de aluminio	30
	Empleando sulfato de aluminio y alginato de sodio	210
200 UNT	Empleando solo sulfato de aluminio	45
	Empleando sulfato de aluminio y alginato de sodio	225

## **CAPITULO 12. CONCLUSIONES**

Se cumplieron con los objetivos de determinar la eficiencia y la viabilidad del uso del alginato de sodio como ayudante de coagulación del sulfato de aluminio para ambas turbiedades, lo cual técnicamente incrementa su eficiencia de remoción de la turbiedad, pero económicamente existe un incremento en los costos. Por lo tanto no es viable utilizar el alginato de sodio como ayudante de coagulación.

### **A).- MUESTRA DE AGUA CON TURBIEDAD 50 UNT**

1.- En la muestra de agua con una turbiedad de 50 UNT, empleando solo el sulfato de aluminio como coagulante se obtuvo una dosis óptima de 20 mg/l con una concentración de 1%, reduciendo la turbiedad a 2,56 UNT.

Al emplear el sulfato de aluminio como coagulante primario y el alginato de sodio como ayudante de coagulación se obtuvo para el sulfato de aluminio una dosis óptima de 20 mg/l con una concentración de 1% y para el alginato de sodio una dosis óptima de 30 mg/l, con una concentración de 0,8%, reduciendo la turbiedad a 0,86 UNT.

De lo anterior expuesto se concluye que a pesar de haber obtenido la misma dosis óptima del sulfato de aluminio se está mejorando en un 66,41% la eficiencia de la remoción de la turbiedad.

2.- Utilizando solo el sulfato de aluminio como coagulante el tiempo óptimo de floculación obtenido es de 25 minutos. Obteniéndose una turbiedad residual de 2,09 UNT, el grado de ajuste de la ecuación de correlación entre G y T, es  $r^2 = 0,90 \geq 0,90$  lo cual es aceptable, en cambio empleando además del coagulante el alginato de sodio el tiempo óptimo de floculación obtenido es de 20 minutos. Obteniéndose una turbiedad residual de 0,94 UNT, el grado

de ajuste de la ecuación de correlación entre G y T, es  $r^2 = 0,95 \geq 0,90$ , por lo tanto con este menor tiempo de floculación permite obtener unidades de menor volumen, con lo cual se tendría un menor costo en la construcción de la planta de tratamiento.

3.- Para la muestra de agua con una turbiedad de 50 UNT la utilización del alginato de sodio como ayudante de coagulación del sulfato de aluminio resultó ser más eficiente al obtenerse una mayor tasa de decantación  $35,5 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$  en cambio empleando solo el sulfato de aluminio como coagulante primario la tasa de decantación es de  $27 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$  en ambos casos turbiedad final es  $\leq 2$  UNT; por lo tanto al incrementarse la tasa de decantación en 31,48% permitirá obtener un decantador de menor volumen que disminuirá los costos en la construcción de la planta de tratamiento.

4.- De las conclusiones anteriormente mencionadas con respecto a los resultados obtenidos referente a la coagulación, floculación y decantación nos demuestran que técnicamente es viable utilizar el alginato de sodio como ayudante de coagulación porque mejora la eficiencia de la remoción de la turbiedad inicial de 50 UNT.

5.- Los costos de producción empleando el alginato de sodio como ayudante de coagulación del sulfato de aluminio son mayores: Para una turbiedad de 50 UNT utilizando solo sulfato de aluminio se obtiene un costo de 30 S./ $1000\text{m}^3$  en cambio empleando además el alginato de sodio como ayudante de coagulación se obtiene un costo de 210 S./  $1000\text{m}^3$ . Este incremento del precio se debe netamente a la utilización del alginato de sodio ya que la dosis del sulfato de aluminio en ambos análisis es el mismo. Se concluye que habría un incremento de costo en los insumos químicos en un 600%.

## B).- MUESTRA DE AGUA CON TURBIEDAD 200 UNT

1.- En la muestra de agua con una turbiedad de 200 UNT, empleando solo el sulfato de aluminio como coagulante se obtuvo una dosis óptima de 30 mg/l con una concentración de 1%, reduciendo la turbiedad a 2,80 UNT.

Al emplear el sulfato de aluminio como coagulante primario y el alginato de sodio como ayudante de coagulación se obtuvo para el sulfato de aluminio una dosis óptima de 30 mg/l con una concentración de 1% y para el alginato de sodio una dosis óptima de 30 mg/l, con una concentración de 0,4%, reduciendo la turbiedad a 1,54 UNT.

De lo anterior expuesto se concluye que a pesar de haber obtenido la misma dosis óptima del sulfato de aluminio se está mejorando en un 45,00% la eficiencia de la remoción de la turbiedad.

2.- Utilizando solo el sulfato de aluminio como coagulante el tiempo óptimo de floculación obtenido es de 25 minutos. Obteniéndose una turbiedad residual de 2,31 UNT, el grado de ajuste de la ecuación de correlación entre G y T, es  $r^2 = 0,90 \geq 0,90$  lo cual es aceptable., en cambio empleando además del coagulante el alginato de sodio el tiempo óptimo de floculación obtenido es de 20 minutos. Obteniéndose una turbiedad residual de 1,28 UNT, el grado de ajuste de la ecuación de correlación entre G y T, es  $r^2 = 0,91 \geq 0,90$ , por lo tanto con este menor tiempo de floculación permite obtener unidades de menor volumen, con lo cual se tendría un menor costo en la construcción de la planta de tratamiento.

3.-Para la muestra de agua con una turbiedad de 200 UNT la utilización del alginato de sodio como ayudante de coagulación del sulfato de aluminio resultó ser más eficiente al obtenerse una mayor tasa de decantación 34

$m^3/m^2/d$  en cambio empleando solo sulfato de aluminio como coagulante primario la tasa de decantación es de  $22 m^3/m^2/d$  en ambos casos turbiedad final es  $\leq 2$  UNT; por lo tanto al incrementarse la tasa de decantación en 54,55% permitirá obtener un decantador de menor volumen que disminuirá los costos en la construcción de la planta de tratamiento.

4.- De las conclusiones anteriormente mencionadas con respecto a los resultados obtenidos referente a la coagulación, floculación y decantación nos demuestran que técnicamente es viable utilizar el alginato de sodio como ayudante de coagulación porque mejora la eficiencia de la remoción de la turbiedad inicial de 200 UNT.

5.- Los costos de producción empleando el alginato de sodio como ayudante de coagulación del sulfato de aluminio son mayores: Para una turbiedad de 200 UNT utilizando solo sulfato de aluminio se obtiene un costo de 45 S./1000m<sup>3</sup> en cambio empleando además el alginato de sodio como ayudante de coagulación se obtiene un costo de 225 S./1000m<sup>3</sup>. Este incremento del precio se debe netamente a la utilización del alginato de sodio ya que la dosis del sulfato de aluminio en ambos análisis es el mismo. Se concluye que habría un incremento de costo en los insumos químicos en un 400%.

### **CAPITULO 13. RECOMENDACIONES**

1. Se deja la posibilidad de complementar el presente trabajo de investigación evaluando la utilización de la solución del alginato de sodio como coagulante primario ya que en nuestra tesis se evaluó el alginato de sodio como ayudante de coagulación.
2. Se recomienda continuar la presente investigación, con otro tipo de alga como la *Lessonia Nigrescens* ya que nuestra investigación es utilizando la *Macrocystis Pyrifera* y así poder ver que alga será más eficiente en la remoción de la turbiedad.
3. En el almacenamiento de la alginato de sodio en polvo evitar que tenga contacto con la humedad ya que se alteraría su solubilidad. Guardarse en empaques secos y herméticos a una temperatura 10 a 20°C, ya que a temperaturas superiores a 50°C se produce despolimerización.
4. Se recomienda continuar la presente investigación, con un agua natural que además de tener turbiedad tenga color.
5. Las soluciones de alginato de sodio independientemente de su concentración se deben preparar diariamente, por ser un producto natural tiende a degradarse rápidamente, si se utiliza la misma muestra para varios días se obtendrán mayores turbiedades finales debido a la degradación del producto.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1.- "Análisis comparativo de polímeros naturales y sintéticos aplicado al tratamiento de aguas".

Valera Salazar, Jaime. Universidad Nacional Autónoma de México.

México, D.F., 11286.

2.- "Análisis de aguas y desagües"

Enrique Jimeno Blasco. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú 1996

3.- "Aplicación de polímeros naturales al tratamiento de potabilización del agua".

Picado Blanco, Luís Paulino. , San José, Aya: 11284

4.- "Aspectos químicos y físicos de la coagulación del agua".

Kirchmer, Cliff J. CEPIS, Lima, Perú; 1977

5.-"Cinética de floculacao de suspensoes coloidais con polielectrólitos naturais".

Hespanhol, Ivanildo. Universidad de Sao Paulo, Escola Politécnica.

6.-"Criterios para la selección de los procesos y de los parámetros óptimos de las unidades"

Ing. Lidia de Vargas



7.-"Flujo turbulento de líquidos con polímeros".

Kolar, V. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana.  
Ingeniería hidráulica; Nov. 11286.

8.- Manual I: "El Agua – Calidad y tratamiento para consumo humano"

Programa regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la calidad del agua  
para consumo humano.

Ing. José Pérez Carrión / ing. Lidia Cenepa de Vargas

9.- Manual V: "Criterios de diseño".

Programa regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la calidad del agua  
para consumo humano.

Ing. José Pérez Carrión / ing. Lidia Cenepa de Vargas

10.- "Polímeros naturales y su aplicación como ayudantes de floculación"

Kirchmer, Cliff J.; Arboleda, J.A; Castro, M.L.; CEPIS, Lima, Perú; 1975

11.- "Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua"

Arboleda, J.A.. Serie técnica N°13. Abril 1973

12.- "Uso apropiado de coagulantes naturales para el abastecimiento de agua  
en el medio rural"

Samia Al Azharia Jahn

Cooperación técnica República Federal de Alemania

13.- "Uso de polielectrolitos como ayudantes de coagulación en las plantas potabilizadores"

Pérez, R., Congreso AIDIS

14.- "Uso de polímeros naturales en el tratamiento de agua para abastecimiento"

José Roberto Campos y Luís Di Bernardo. Universidad de Sao Carlos Paúl-  
Escuela de Ingeniería de Sao Carlos-Brasil

#### PAGINAS DE INTERNET

1.- Algas

Pagina Web:

<http://www.profesorenlinea.cl/flora/Algas.htm>

2.- Alginatos

Pagina Web:

<http://www.monografias.com/trabajos12/alginato/alginato.shtml>

3.- Alginato y sus propiedades

Pagina Web:

[http://www.kimica.jp/spanish/pag05\\_proceso.htm](http://www.kimica.jp/spanish/pag05_proceso.htm)

4.- Algas pardas

Pagina Web:

<http://www.algaspardas.cl/usos.htm>

**5.- Manual de instrucciones del turbidímetro de laboratorio Modelo 2100N  
Hach**

**Pagina Web:**

**[http://www.hach.com/fmmimghach?/code%3a4700093\\_2ed12588%7c1](http://www.hach.com/fmmimghach?/code%3a4700093_2ed12588%7c1)**

**6.- Polímeros y biomoléculas**

**Pagina Web:**

**<http://www.monografias.com/trabajos11/polim/polim.shtml>**

**7.- Producción de alginatos comerciales a partir de algas pardas patagónicas**

**Pagina Web:**

**<http://www.aqa.org.ar/iyqparte2.htm>**

**Alfio A. Zambon a, Manuel M. Rodríguez b, Víctor U. Miguel b y Alberto F.  
Errazu ba (Dto. Farmacia, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan  
Bosco, Ciudad Universitaria, Comodoro Rivadavia)**