

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE OPERACION Y MANTENIMIENTO  
DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO UNO Y DOS  
DEL ACUEDUCTO DE CARTAGENA

HUGO ARNALDO PINEDA GOMEZ

Proyecto de Grado presentado como requisito  
parcial para optar el título de Ingeniero Civil

CARTAGENA

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Junio de 1991



Cuídame como a tu mejor compañero y  
amigo. Contribuyo con tu crecimiento  
intelectual, académico y cultural.

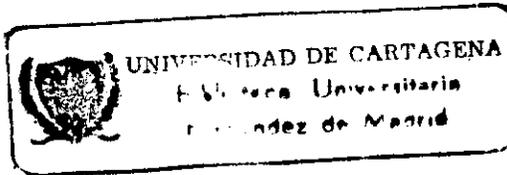
EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE OPERACION Y MANTENIMIENTO  
DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO UNO Y DOS  
DEL ACUEDUCTO DE CARTAGENA

HUGO ARNALDO PINEDA GOMEZ  
//

57148

**SCIB**  
00025213

CARTAGENA  
UNIVERSIDAD DE CARTAGENA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
1991



EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE OPERACION Y MANTENIMIENTO  
DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO UNO Y DOS  
DEL ACUEDUCTO DE CARTAGENA

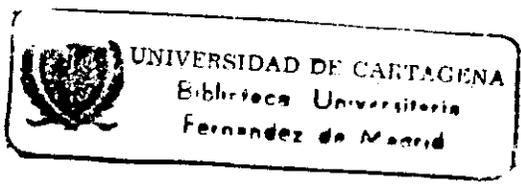
HUGO ARNALDO PINEDA GOMEZ

Trabajo de Grado presentado como requisito  
parcial para optar el título de Ingeniero Civil  
Director : ENRIQUE CHARTUNI

I.C.

CARTAGENA  
UNIVERSIDAD DE CARTAGENA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

1991



Nota de Aceptación

Four horizontal lines for text entry.

Presidente del Jurado

One horizontal line for text entry.

Jurado

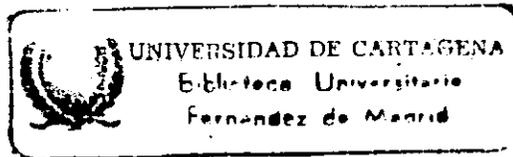
One horizontal line for text entry.

Jurado

One horizontal line for text entry.

Demado por la 100 de Ingeniería, 11/1/91

Con todo mi amor  
a mis padres,  
quienes no me permitieron  
desfallecer



### AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos:

- A ENRIQUE CHARTUNI, I.C., Gerente de las Empresas Públicas de Cartagena, Profesor de Hidráulica de la Universidad de Cartagena y Director del proyecto.
- A BENJAMIN ALVAREZ, I.C., Profesor de Sanitaria de la Universidad de Cartagena.
- A GERMAN LOCARNO, I.C., Jefe de la Planta de tratamiento de aguas El Bosque.
- A VICTOR DE LA OSSA, Jefe de Operaciones de la planta de tratamiento de aguas El Bosque.
- A El personal de la planta de tratamiento de aguas El Bosque.
- A La FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL de la Universidad de Cartagena.
- A Todas aquellas personas que en una u otra forma colaboraron en la realización del presente trabajo.

**TABLA DE CONTENIDO**

	<b>Pág.</b>
1. ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO	1
2. DESCRIPCION DE LA CIUDAD DE CARTAGENA	10
2.1 GENERALIDADES	10
2.2 DESARROLLO INDUSTRIAL	12
2.3 DESARROLLO TURISTICO Y COMERCIAL	13
2.4 RESEÑA HISTORICA	15
2.5 ESTADO DE SALUBRIDAD DE LA CIUDAD	17
2.6 ESTADO DE LOS SERVICIOS PUBLICOS	18
2.6.1 Acueducto.	18
2.6.2 Alcantarillado.	19
2.6.3 Energia eléctrica.	20
2.6.4 Telefonía.	21
2.7 DEMANDA Y CONSUMO DE AGUA DE LA CIUDAD	22
3. DESCRIPCION GENERAL DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO	24
3.1 SISTEMA DE ADUCCION DEL ACUEDUCTO DE CARTAGENA	24
3.1.1 Reseña historica del canal del Dique.	24
3.2 CAPTACION Y CONDUCCION DEL AGUA CRUDA	26
3.2.1 Captación en Gambote.	26
3.2.2 Captación de Dolores.	29

	Pág.
3.2.2.1 Estación de Conejos.	30
3.2.2.2 Estación de Dolores.	30
3.2.2.3 Estación de Piedrecitas.	31
3.2.2.4 Estación de Albornoz.	32
3.2.2.5 Estación eléctrica de Alco.	33
3.3 PLANTA DE TRATAMIENTO	34
3.4 ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCION	36
4. DESCRIPCION GENERAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA "EL BOSQUE"	38
4.1 DESCRIPCION DE LA PLANTA UNO	40
4.1.1 Tanques de compensación.	41
4.1.2 Mezcla rápida.	43
4.1.3 Floculación.	46
4.1.3.1 Floculador hidráulico Fl <sub>1-1</sub>	46
4.1.3.2 Floculador Fl <sub>2-1</sub>	49
4.1.4 Sedimentadores	49
4.1.5 Filtración	52
4.1.6 Desinfección	56
4.1.7 Otros equipos y estructuras.	61
4.2 DESCRIPCION DE LA PLANTA NUMERO DOS.	63
4.2.1 Coagulación.	64
4.2.2 Floculación.	64
4.2.3 Sedimentación.	66
4.2.4 Filtración.	67
4.2.5 Desinfección.	73

	Pág.
4.2.6 Otros equipos y estructuras.	73
5. ACTIVIDADES DE EVALUACION	75
5.1 COAGULACION	77
5.1.1 Selección de sustancias químicas.	79
5.1.1.1 Dosis óptima de coagulante. La prueba de jarras.	79
5.1.1.2 pH óptimo de coagulación.	90
5.1.1.3 Concentración óptima a la que debe dosificarse el coagulante.	96
5.1.1.4 Tiempo óptimo de mezcla rápida.	99
5.1.2 Manejo y almacenamiento de sustancias químicas.	104
5.1.3 Dosificación de sustancias químicas.	109
5.1.4 Evaluación de la mezcla rápida.	115
5.1.4.1 Eficiencia comparativa del proceso.	117
5.1.4.2 Tiempo de retención de la unidad de mezcla rápida.	119
5.1.4.3 Intensidad de la mezcla rápida.	153
5.1.4.4 Condiciones hidráulicas en obras de conexión de mezcla rápida y floculación.	157
5.2 EVALUACION DEL PROCESO DE FLOCULACION.	160
5.2.1 Tiempo óptimo de mezcla lenta.	162
5.2.2 Gradientes de operación actual de los floculadores.	170
5.2.3 Tamaño del flóculo producido, tiempo de aparición del mismo y eficiencia comparativa del proceso.	171
5.2.4 Caudal real de trabajo de los floculadores.	175

	Pág.
5.2.5 Período de retención y características hidráulicas de los floculadores.	176
5.3 EVALUACION DEL PROCESO DE SEDIMENTACION.	218
5.3.1 Determinación de la eficiencia.	220
5.3.1.1 En función de la calidad del agua cruda.	220
5.3.1.2 En función de la calidad del agua sedimentada.	227
5.3.1.3 En función de la carga superficial.	230
5.3.1.4 En función del pretratamiento.	239
5.3.2 Determinación de las condiciones hidráulicas en sedimentadores.	243
5.3.2.1 Porcentajes de flujo de pistón y mezclado.	275
5.3.2.2 Espacios muertos y cortocircuitos.	275
5.3.2.3 Carga superficial real.	276
5.3.2.4 Tiempo real de detención del sedimentador.	277
5.3.2.5 Determinación de las líneas de flujo y topogramas de turbiedad.	277
5.3.3 Características de la zona de entrada.	285
5.3.4 Características de la zona de salida.	290
5.3.5 Características de la zona de depósito de lodos.	292
5.3.5.1 Características de las obras de desagües y descarga.	295
5.4 EVALUACION DE LA FILTRACION.	296
5.4.1 Características del proceso de filtración.	299
5.4.1.1 Velocidad y caudal de filtración.	301
5.4.1.2 Pérdida de carga.	303

	Pág.
5.4.1.2.1 Fluctuaciones de presión en el filtro.	306
5.4.1.3 Calidad del filtrado inicial.	307
5.4.1.4 Carrera óptima de filtración.	310
5.4.1.5 Eficiencia del proceso de filtración.	314
5.4.1.5.1 En función del agua filtrada.	314
5.4.1.5.2 Correlación de la turbiedad agua decantada - agua filtrada.	319
5.4.2 Características del lecho filtrante.	322
5.4.2.1 Granulometría del lecho filtrante.	323
5.4.2.2 Ensayo de bolas de barro.	327
5.4.2.3 Fugas de arena.	328
5.4.2.4 Lecho de grava.	329
5.4.3 Características del proceso de lavado del filtro.	333
5.4.3.1 El lavado del filtro.	334
5.4.3.2 Velocidad y caudal de filtración antes del lavado.	338
5.4.3.3 Velocidad y caudal de lavado del filtro.	341
5.4.3.4 Velocidad y caudal después del lavado.	346
5.4.3.5 Expansión del lecho filtrante.	349
5.4.3.6 Duración de la operación de lavado.	351
5.5 EVALUACION DE LA DESINFECCION.	354
5.5.1 Concentración y tiempo de contacto del cloro.	359
5.5.5 Curva de demanda de cloro.	360
5.5.3 Mecanismos y estructuras para la cloración.	366
5.5.4 Comportamiento de la desinfección en el tiempo.	368

	<b>Pág.</b>
<b>6. EVALUACION DE LA OPERACION.</b>	<b>373</b>
6.1 ASPECTOS GENERALES Y DEFINICIONES	373
6.2 EVALUACION DE LAS MANIOBRAS DE OPERACION	380
6.2.1 Descripción de la operación normal.	381
6.2.2 Evaluación del personal.	387
6.2.4 Evaluación de los procedimientos de control.	390
6.2.5 Evaluación de los recursos complementarios.	392
6.2.6 Evaluación de la supervisión.	393
6.2.7 Evaluación del manual de operación.	394
6.2.8 Evaluación del balance de agua en la planta.	397
6.2.9 Evaluación de la operación de equipos especiales.	400
6.2.10 Evaluación de la operación eventual de la planta.	402
6.2.11 Evaluación de la operación de emergencia.	407
6.3 EVALUACION DEL MANTENIMIENTO.	414
6.3.1 Evaluación de programas, manuales de mantenimiento y estadísticas.	417
6.3.2 Estado de los componentes de la planta.	419
6.3.3 Recursos necesarios para el mantenimiento.	432
6.3.3.1 Recursos humanos.	432
6.3.3.2 Recursos materiales.	437
6.4 EVALUACION DEL CONTROL DE CALIDAD	442
6.4.1. Procedimientos de control.	443
6.4.2. Estadísticas de la calidad de agua.	447
6.4.3 Recursos para el control de calidad.	450

	Pag.
6.5 EVALUACION DE LA ADMINISTRACION.	452
6.5.1 Evaluación de la gestión del personal.	456
6.5.2 Gestión de materiales.	465
6.5.3 Evaluación de la organización administrativa.	471
7.0 CONCLUSIONES	479
8.0 RECOMENDACIONES.	484
BIBLIOGRAFIA	487

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1. Consumo de energía en estaciones de bombeo.	34
TABLA 2. Datos iniciales para ensayo de jarras.	83
TABLA 3. Resultados ensayo de jarras. Primera serie.	84
TABLA 4. Resultados ensayo de jarras. Segunda serie.	84
TABLA 5. Resultados ensayo de jarras. Tercera serie.	84
TABLA 6. Datos iniciales para ensayo de jarras.	86
TABLA 7. Resultados ensayo de jarras.	86
TABLA 8. Datos iniciales para ensayo de jarras.	86
TABLA 9. Resultados ensayo de jarras.	87
TABLA 10. Resultados ensayo de jarras. $T_0 = 57$ U.N.T.	87
TABLA 11. Resultados ensayo de jarras. $T_0 = 60$ U.N.T.	87
TABLA 12. Datos iniciales para ensayo de jarras.	88
TABLA 13. Resultados ensayo de jarras. Primera serie.	88
TABLA 14. Resultados ensayo de jarras. Segunda serie.	88
TABLA 15. Resultados ensayo de jarras. Tercera serie.	89
TABLA 16. Resultados ensayo de jarras. Cuarta serie.	89
TABLA 17. Resultados ensayo de jarras. Quinta serie.	89
TABLA 18. Datos iniciales para ensayo pH óptimo.	92
TABLA 19. Resultados ensayo para determinar pH óptimo.	93

	Pág.
<b>TABLA 20.</b> Datos iniciales para ensayo pH óptimo.	93
<b>TABLA 21.</b> Resultados ensayo para determinar pH óptimo.	94
<b>TABLA 22.</b> Datos para ensayo de concentración óptima.	96
<b>TABLA 23.</b> Resultados de ensayo de jarras para determinar concentración óptima del coagulante.	97
<b>TABLA 24.</b> Datos iniciales. Ensayo de jarras para determinar el tiempo óptimo de mezcla rápida.	100
<b>TABLA 25.</b> Resultados de ensayo de jarras para determinar tiempo óptimo de mezcla rápida.	100
<b>TABLA 26.</b> Datos iniciales. Ensayo de jarras para determinar el tiempo óptimo de mezcla rápida.	101
<b>TABLA 27.</b> Resultados de ensayo de jarras para determinar tiempo óptimo de mezcla rápida. Primera serie.	101
<b>TABLA 28.</b> Resultados de ensayo de jarras para determinar tiempo óptimo de mezcla rápida. Segunda serie.	101
<b>TABLA 29.</b> Resultados de ensayo de jarras para determinar tiempo óptimo de mezcla rápida. Tercera serie.	102
<b>TABLA 30.</b> Resultados de ensayo de jarras para determinar tiempo óptimo de mezcla rápida. Cuarta serie.	102
<b>TABLA 31.</b> Especificaciones de calidad que debe cumplir el sulfato de aluminio tipo B.	106
<b>TABLA 32.</b> Peso de muestras para determinar grado de exactitud del dosificador de sulfato de aluminio.	110
<b>TABLA 33.</b> Calificación de la exactitud del dosificador de sulfato de aluminio.	113
<b>TABLA 34.</b> Calificación de la eficiencia de la cámara de mezcla rápida.	118
<b>TABLA 35.</b> Datos de Ensayo de trazadores en la unidad de Mezcla rápida. Enero 18 de 1990. (1)	124
<b>TABLA 35.</b> Datos de Ensayo de trazadores en la unidad de Mezcla rápida. Enero 18 de 1990. (2)	125

	Pág.
<b>TABLA 36.</b> Resultados Ensayo de Trazadores - Unidad de Mezcla Rápida. Plantas uno y dos. (1)	132
<b>TABLA 36.</b> Resultados Ensayo de Trazadores - Unidad de Mezcla Rápida. Plantas uno y dos. (2)	133
<b>TABLA 37.</b> Datos del ensayo de trazadores en la unidad de mezcla rápida. Enero 23 de 1990	140
<b>TABLA 38.</b> Resultados Ensayo de Trazadores Unidad de Mezcla Rápida. Ene 23/90. Plantas uno y dos.	144
<b>TABLA 39.</b> Distribución del flujo que sale de la cámara de mezcla rápida.	152
<b>TABLA 40.</b> Valores de $v_g/v_u$ para distintas temperaturas.	155
<b>TABLA 41.</b> Valores óptimos de Gradiente de velocidad.	156
<b>TABLA 42.</b> Gradientes de velocidad en tubos que conectan la mezcla rápida con los floculadores	158
<b>TABLA 43.</b> Datos iniciales del ensayo de jarras para determinar tiempo óptimo de mezcla lenta.	163
<b>TABLA 44.</b> Resultados del ensayo de jarras para determinar tiempo óptimo de mezcla lenta.	163
<b>TABLA 45.</b> Puntos de la recta T vs G.	166
<b>TABLA 46.</b> Gradientes que producen la mayor eficiencia para distintos tiempos de floculación.	166
<b>TABLA 47.</b> Gradientes de velocidad en un floculador adecuado para la calidad de agua a tratar.	170
<b>TABLA 48.</b> Gradientes de operación de los floculadores.	171
<b>TABLA 49.</b> Índice de floculación de Willcomb.	172
<b>TABLA 50.</b> Tiempo de aparición del floc e índice de Willcomb, en ensayo en laboratorio.	173
<b>TABLA 51.</b> Tiempo de aparición del floc e índice de Willcomb, encontrado en la planta.	173
<b>TABLA 52.</b> Eficiencia comparativa de la floculación.	174

	Pág.
<b>TABLA 53.</b> Caudal real de trabajo de los floculadores.	175
<b>TABLA 54.</b> Condiciones hidráulicas en el floculador uno de la planta uno, según ensayo de trazadores.	178
<b>TABLA 55.</b> Condiciones hidráulicas en el floculador uno de la planta dos, según ensayo de trazadores.	180
<b>TABLA 56.</b> Datos de ensayo de trazadores - Unidad de Floculación uno - Planta uno. Ene 19/90.	180
<b>TABLA 57.</b> Datos de ensayo de trazadores - Unidad de Floculación uno. - Planta uno. Ene 19/90.	183
<b>TABLA 58.</b> Datos de ensayo de trazadores - Unidad de Floculación uno. - Planta uno. Ene 19/90.	183
<b>TABLA 59.</b> Resultados de ensayo de trazadores - Unidad de Floculación uno. - Planta uno.	188
<b>TABLA 60.</b> Resultados de ensayo de trazadores - Unidad de Floculación uno. - Planta uno. $T_0=25$ min	197
<b>TABLA 61.</b> Datos de ensayo de trazadores - Unidad de Floculación uno. - Planta dos. - Ene 23/90.	202
<b>TABLA 62.</b> Resultados de ensayo de trazadores - Unidad de Floculación uno. - Planta dos.	207
<b>TABLA 63.</b> Resultados de ensayo de trazadores - Unidad de Floculación uno. - Planta dos.	212
<b>TABLA 64.</b> Resultados de ensayo de trazadores - Unidad de Floculación uno. - Planta dos.	215
<b>TABLA 65.</b> Correlación entre turbiedades del agua cruda y del agua sedimentada. Plantas uno y dos.	222
<b>TABLA 66.</b> Eficiencia comparativa de sedimentadores.	225
<b>TABLA 67.</b> Eficiencia de la sedimentación para distintas turbiedades del agua cruda a tratar.	226
<b>TABLA 68.</b> Clasificación de sedimentadores en función de la calidad de agua producida.	227
<b>TABLA 69.</b> Eficiencia del proceso de sedimentación en función de la calidad del agua producida.	228

	Pág.
<b>TABLA 70.</b> Eficiencia teórica del proceso de sedimentación Datos de ensayo y resultados en laboratorio.	233
<b>TABLA 71.</b> Eficiencia real del sedimentador $S_{3-2}$ . Resumen de datos.	235
<b>TABLA 72.</b> Eficiencia real del sedimentador $S_{1-1}$ . Resumen de datos.	235
<b>TABLA 73.</b> Eficiencia real del sedimentador $S_{1-2}$ . Resumen de datos.	236
<b>TABLA 74.</b> Calificación de la eficiencia en función de carga superficial.	240
<b>TABLA 75.</b> Eficiencia de la sedimentación en función del pretratamiento. Plantas uno y dos.	241
<b>TABLA 76.</b> Datos de ensayo de trazadores en canales distribuidores de agua a sedimentadores de la Planta dos.	245
<b>TABLA 77.</b> Datos de ensayo de trazadores en canales distribuidores de agua a sedimentadores de la Planta uno.	250
<b>TABLA 78.</b> Resultados de ensayo de trazadores en canales distribuidores de agua a sedimentadores de la Planta dos. Puntos 1 y 2.	254
<b>TABLA 79.</b> Resultados de ensayo de trazadores en canales distribuidores de agua a sedimentadores de la Planta dos. Puntos 3 y 4.	257
<b>TABLA 80.</b> Resultados de ensayo de trazadores en canales distribuidores de agua a sedimentadores de la Planta uno. Puntos 5, 6 y 7.	260
<b>TABLA 81.</b> Distribución de caudales a los sedimentadores.	264
<b>TABLA 82.</b> Datos ensayo de trazadores en el sedimentador uno de la planta uno. ( $S_{1-1}$ ). Feb 3/90.	267
<b>TABLA 83.</b> Resultados ensayo de trazadores en el sedimentador uno de la planta uno. ( $S_{1-1}$ ).	270
<b>TABLA 84.</b> Valores de turbiedad en U.N.T. para el dibujo de las curvas de isoturbiedad. $S_{3-2}$ .	278

	Pág.
<b>TABLA 85.</b> Valores de turbiedad en U.N.T. para el dibujo de las curvas de isoturbiedad. $S_{1-2}$ .	279
<b>TABLA 86.</b> Características de la zona de entrada a los sedimentadores. Plantas uno y dos.	287
<b>TABLA 87.</b> Caudales de filtración. Plantas uno y dos.	302
<b>TABLA 88.</b> Datos de pérdida de carga durante la carrera de filtración.	304
<b>TABLA 89.</b> Evaluación de las fluctuaciones de presión en los filtros. Planta uno.	306
<b>TABLA 90.</b> Calidad del agua en función de la fluctuación de la pérdida de carga.	307
<b>TABLA 91.</b> Turbiedades del agua durante el filtrado inicial. Filtros $F_{2-1}$ , $F_{4-1}$ y $F_{1-2}$ .	310
<b>TABLA 92.</b> Pérdida de carga y calidad del agua producida durante la carrera de filtración. Filtro $F_{2-1}$ .	312
<b>TABLA 93.</b> Turbiedades de agua en la Planta uno, en el periodo de Enero a Diciembre/89.(En U.N.T.)	315
<b>TABLA 94.</b> Turbiedades de agua en la Planta uno, en el periodo de Enero a Diciembre/89.(En U.N.T.)	316
<b>TABLA 95.</b> Eficiencia del proceso de filtración en función de la calidad del agua producida.	317
<b>TABLA 96.</b> Turbiedades promedio de agua sedimentada y de agua filtrada. Planta uno. Ene-Dic/89.	321
<b>TABLA 97.</b> Turbiedades promedio de agua sedimentada y de agua filtrada. Planta dos. Ene-Dic/89.	321
<b>TABLA 98.</b> Granulometria del lecho filtrante.	324
<b>TABLA 99.</b> Resultados de ensayo de granulometria del lecho filtrante. Filtro $F_{2-1}$ .	325
<b>TABLA 100.</b> Calificación del estado de conservación de los lechos filtrantes.	328
<b>TABLA 101.</b> Expansión del lecho filtrante en el lavado.	350
<b>TABLA 102.</b> Turbiedades del agua de lavado de filtros.	352

	Pág.
<b>TABLA 103.</b> Valores para curva de demanda de cloro.	363
<b>TABLA 104.</b> Registros de turbiedad, color y residuales de cloro. Acueducto de Cartagena. Ene-Abr/89	369
<b>TABLA 105.</b> Registros de turbiedad, color y residuales de cloro. Acueducto de Cartagena. May-Ago/89	370
<b>TABLA 106.</b> Registros de turbiedad, color y residuales de cloro. Acueducto de Cartagena. Sep-Dic/89	371
<b>TABLA 107.</b> Frecuencia de presentación de valores de cloro residual. Acueducto de Cartagena.	372
<b>TABLA 108.</b> Evaluación de los procedimientos para el mantenimiento. Plantas uno y dos.	417
<b>TABLA 107.</b> Frecuencia de presentación de valores de cloro residual. Acueducto de Cartagena.	448
<b>TABLA 109.</b> Distribución de frecuencias de la turbidez y color del agua producida. Año 1989.	449
<b>TABLA 110.</b> Resumen de temas contenidos en el Reglamento de Trabajo y Convención Colectiva de Trabajo.	458
<b>TABLA 111.</b> Evaluación del registro de personal.	459
<b>TABLA 112.</b> Evaluación de la higiene y seguridad.	464

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. Flujograma de actividades desarrolladas.	6
FIGURA 2. Esquema de funcionamiento de la Planta de tratamiento "EL BOSQUE."	39
FIGURA 3. Unidad de mezcla rápida.	45
FIGURA 4. Floculadores de la planta uno.	47
FIGURA 5. Sedimentadores de la planta uno.	51
FIGURA 6. Dibujo de filtro tipo de la Planta uno.	54
FIGURA 7. Perfil de filtro típico.	55
FIGURA 8. Galería de desinfección.	57
FIGURA 9. Esquema de funcionamiento de cloradores.	59
FIGURA 10. Floculador de la planta dos.	65
FIGURA 11. Sedimentador típico planta dos.	68
FIGURA 12. Filtro tipo de la planta dos.	70
FIGURA 13. Equipo para el ensayo de jarras.	81
FIGURA 14. Dosis óptima de coagulante.	85
FIGURA 15. pH óptimo para la coagulación	95
FIGURA 16. Concentración óptima del coagulante	98
FIGURA 17. Tiempo óptimo de mezcla rápida.	103
FIGURA 18. Curva de calibración del dosificador	111
FIGURA 19. Sitio de muestreos para ensayo de trazadores en la unidad de mezcla rápida.	123
FIGURA 20. Ensayo de trazadores. Punto de muestreo 1.	126
FIGURA 21. Ensayo de trazadores. Punto de muestreo 2.	127

	Pág.
FIGURA 22. Ensayo de trazadores. Punto de muestreo 3.	128
FIGURA 23. Ensayo de trazadores. Punto de muestreo 1.	135
FIGURA 24. Ensayo de trazadores. Punto de muestreo 2.	137
FIGURA 25. Ensayo de trazadores. Punto de muestreo 3.	139
FIGURA 26. Ensayo de trazadores. Punto de muestreo 1.	141
FIGURA 27. Ensayo de trazadores. Punto de muestreo 2.	142
FIGURA 28. Ensayo de trazadores. Punto de muestreo 3.	143
FIGURA 29. Ensayo de trazadores. Punto de muestreo 1.	146
FIGURA 30. Ensayo de trazadores. Punto de muestreo 2.	148
FIGURA 31. Ensayo de trazadores. Punto de muestreo 3.	150
FIGURA 32. Tiempo óptimo de floculación.	165
FIGURA 33. Gradientes óptimos de floculación	167
FIGURA 34. Grafica T vs G	168
FIGURA 35. Ensayo de trazadores. Floculador 1. Planta 1. Punto de muestreo 1.	181
FIGURA 36. Ensayo de trazadores. Floculador 1. Planta 1. Punto de muestreo 2.	182
FIGURA 37. Ensayo de trazadores. Floculador 1. Planta 1. Punto de muestreo 3.	184
FIGURA 38. Ensayo de trazadores. Floculador 1. Planta 1. Punto de muestreo 4.	185
FIGURA 39. Ensayo de trazadores. Floculador 1. Planta 1. Punto de muestreo 5.	186
FIGURA 40. Ensayo de trazadores. Floculador 1. Planta 1. Punto de muestreo 6.	187
FIGURA 41. Resultados Ensayo de trazadores. Floculador 1. Planta 1. Punto de muestreo 1.	190

	Pág.
FIGURA 42. Resultados Ensayo de trazadores. Floculador 1. Planta 1. Punto de muestreo 2.	192
FIGURA 43. Resultados Ensayo de trazadores. Floculador 1. Planta 1. Punto de muestreo 3.	194
FIGURA 44. Resultados Ensayo de trazadores. Floculador 1. Planta 1. Punto de muestreo 4.	196
FIGURA 45. Resultados Ensayo de trazadores. Floculador 1. Planta 1. Punto de muestreo 5.	199
FIGURA 46. Resultados Ensayo de trazadores. Floculador 1. Planta 1. Punto de muestreo 6.	201
FIGURA 47. Ensayo de trazadores. Floculador 1. Planta 2. Punto de muestreo 1.	203
FIGURA 48. Ensayo de trazadores. Floculador 1. Planta 2. Punto de muestreo 2.	204
FIGURA 49. Ensayo de trazadores. Floculador 1. Planta 2. Punto de muestreo 3.	205
FIGURA 50. Ensayo de trazadores. Floculador 1. Planta 2. Punto de muestreo 4.	206
FIGURA 51. Resultados Ensayo de trazadores. Floculador 1. Planta 2. Punto de muestreo 1.	209
FIGURA 52. Resultados Ensayo de trazadores. Floculador 1. Planta 2. Punto de muestreo 2.	211
FIGURA 53. Resultados Ensayo de trazadores. Floculador 1. Planta 2. Punto de muestreo 3.	214
FIGURA 54. Resultados Ensayo de trazadores. Floculador 1. Planta 2. Punto de muestreo 4.	217
FIGURA 55. Eficiencia del proceso de sedimentación en función del agua cruda. Planta 1.	223
FIGURA 56. Eficiencia del proceso de sedimentación en función del agua cruda. Planta 2.	224
FIGURA 57. Curva de frecuencias de turbiedad en el agua sedimentada. Plantas uno y dos.	229

	Pág.
FIGURA 58. Puntos muestreo para determinar la eficiencia en función de la carga superficial.	234
FIGURA 59. Eficiencia del sedimentador en función de la carga superficial.	237
FIGURA 60. Influencia del pretratamiento en el proceso de sedimentación.	242
FIGURA 61. Curva $C-C_0$ vs. $t/T_0$ . Ensayo de trazadores canales a sedimentadores. Punto 1.	246
FIGURA 62. Curva $C-C_0$ vs. $t/T_0$ . Ensayo de trazadores canales a sedimentadores. Punto 2.	247
FIGURA 63. Curva $C-C_0$ vs. $t/T_0$ . Ensayo de trazadores canales a sedimentadores. Punto 3.	248
FIGURA 64. Curva $C-C_0$ vs. $t/T_0$ . Ensayo de trazadores canales a sedimentadores. Punto 4.	249
FIGURA 65. Curva $C-C_0$ vs. $t/T_0$ . Ensayo de trazadores canales a sedimentadores. Punto 5.	251
FIGURA 66. Curva $C-C_0$ vs. $t/T_0$ . Ensayo de trazadores canales a sedimentadores. Punto 6.	252
FIGURA 67. Curva $C-C_0$ vs. $t/T_0$ . Ensayo de trazadores canales a sedimentadores. Punto 7.	253
FIGURA 68. Curva $\log(C-C_0)$ vs. $t/T_0$ . Ensayo de trazadores canales a sedimentadores. Punto 1.	255
FIGURA 69. Curva $\log(C-C_0)$ vs. $t/T_0$ . Ensayo de trazadores canales a sedimentadores. Punto 2.	256
FIGURA 70. Curva $\log(C-C_0)$ vs. $t/T_0$ . Ensayo de trazadores canales a sedimentadores. Punto 3.	258
FIGURA 71. Curva $\log(C-C_0)$ vs. $t/T_0$ . Ensayo de trazadores canales a sedimentadores. Punto 4.	259
FIGURA 72. Curva $\log(C-C_0)$ vs. $t/T_0$ . Ensayo de trazadores canales a sedimentadores. Punto 5.	261
FIGURA 73. Curva $\log(C-C_0)$ vs. $t/T_0$ . Ensayo de trazadores canales a sedimentadores. Punto 6.	262

	Pag.
FIGURA 74. Curva $\log(C-C_0)$ , vs. $t/T_0$ . Ensayo de trazadores canales a sedimentadores. Punto 7.	263
FIGURA 75. Curva $(C-C_0)$ , vs. $t/T_0$ . Ensayo de trazadores en sedimentador S1-1. Punto 1.	268
FIGURA 76. Curva $(C-C_0)$ , vs. $t/T_0$ . Ensayo de trazadores en sedimentador S1-1. Punto 2.	269
FIGURA 77. Curva $\log(C-C_0) - t/T_0$ . Ensayo de trazadores en sedimentador S1-1. Punto 1.	272
FIGURA 78. Curva $\log(C-C_0) - t/T_0$ . Ensayo de trazadores en sedimentador S1-1. Punto 2.	274
FIGURA 79. Curvas de isoturbiedad. Secciones transversales Sedimentador S3-2.	280
FIGURA 80. Curvas de isoturbiedad. Sección longitudinal Sedimentador S3-2.	281
FIGURA 81. Curvas de isoturbiedad. Secciones transversales Sedimentador S1-2.	282
FIGURA 82. Curvas de isoturbiedad. Sección longitudinal Sedimentador S1-2.	283
FIGURA 83. Topograma de lodos. Sedimentador S2-1.	293
FIGURA 84. Topograma de lodos. Sedimentador S3-2.	294
FIGURA 85. Pérdida de carga durante la carrera de filtración. Filtro F2-1. Planta uno.	305
FIGURA 86. Turbiedades del agua producida durante el filtrado inicial. Filtros F2-1, F3-1 y F1-2.	309
FIGURA 87. Pérdida de carga y calidad del agua producida durante la carrera de filtración. Filtro F2-1	313
FIGURA 88. Eficiencia de la filtración en función de la calidad del agua producida. Plantas 1 y 2.	318
FIGURA 89. Curva de correlación entre la calidad del agua sedimentada y la del agua filtrada.	320
FIGURA 90. Curva granulométrica del lecho de arena en el Filtro F3-1.	326

	Pág.
FIGURA 91. Topograma del lecho de gravas del filtro F <sub>1-1</sub>	330
FIGURA 92. Topograma del lecho de gravas del filtro F <sub>2-1</sub>	331
FIGURA 93. Topograma del lecho de gravas del filtro F <sub>1-2</sub>	332
FIGURA 94. Duración de la operación de lavado del filtro.	353
FIGURA 95. Curvas de demanda de cloro.	364
FIGURA 96. Organigrama. Empresas Públicas de Cartagena	454
FIGURA 97. Organigrama de la Planta de Tratamiento.	473

## INTRODUCCION

Al término de los deberes académicos como estudiante de Ingeniería Civil y ante la expectativa de la graduación, quise realizar un trabajo especial, que procurara ser el compendio de todo lo aprendido en los años de estudio cursados.

Asumí el reto que constitula la ejecución de este proyecto, con el firme convencimiento de que éste me reportaría nuevas y gratas experiencias. Y además reafirmaría el amor a la profesión que he escogido para servir a nuestra comunidad.

Ahora, al presentar el informe de la labor realizada, no tengo dudas de lo acertada que fue aquella decisión, y que si bien la tarea no fue fácil, tampoco resultó un escollo imposible de vencer.

Y es que nada fue más grato que poder dedicarme al estudio de un área de tan marcada influencia para el

desarrollo de la comunidad, como lo es el tratamiento de agua para consumo humano.

Con este trabajo aprendemos a valorar la gran función social a que está llamado a ejecutar el Ingeniero civil, aparte de las tareas a que normalmente se aplica tales como el diseño y construcción de estructuras, drenajes y demás obras civiles.

También nos pone de manifiesto que en el campo de la ingeniería sanitaria es mucho lo que hay por hacer en cuanto a la innovación de tecnologías propias y soluciones adecuadas a las condiciones de limitados recursos de nuestras comunidades, sin que ello signifique sacrificio de los resultados finales.

Hubo las dificultades obvias correspondientes a la apatía con que se trata a la investigación en nuestro medio. No obstante se salvaron en cuanto fue posible y pudo en gran parte cumplirse con los objetivos trazados al iniciarse el proyecto.

En las páginas siguientes se pone a consideración del lector el resultado de las observaciones y experiencias recopiladas durante los cinco meses de desarrollo del tema propuesto.

El plan seguido para la exposición de los mismos es muy similar a la programación seguida en la ejecución de las actividades del proyecto.

Inicialmente se tratan algunas generalidades del tema propuesto, una breve descripción de la ciudad de Cartagena y de su sistema de abastecimiento de agua.

Luego se detallan los componentes de las plantas de tratamiento a evaluar y cada una de las actividades de evaluación ejecutadas. Procuramos hacer una ilustración de los parámetros de control, las tareas y prácticas realizadas para el monitoreo y sus correspondientes resultados.

En capítulo aparte se recopilan las conclusiones de estas experiencias y así mismo las recomendaciones que a nuestro juicio han de seguirse.

Con gran complacencia deseo participar al lector el alto deber de gratitud que tengo para todas aquellas personas que en una u otra forma colaboraron en la ejecución de este trabajo. A los profesores de la facultad de Ingeniería Civil; al Director del proyecto, Ing. Enrique Chartuni; a los ingenieros de las Empresas Públicas; a

todo el personal que labora en la planta de tratamiento El Bosque, quienes bajo la dirección del Ing. Germán Locarno apoyaron decididamente este proyecto. Y muy especialmente a mis padres quienes con su irrestricto y permanente apoyo me mantuvieron perseverando en mi empeño.

Con la seguridad de no haber desaprovechado el esfuerzo de todas estas personas y confiado en no decepcionar sus expectativas, me resta decir: ¡Adelante, amigo lector. Este trabajo ahora es suyo!

El Autor

## 1. ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO

La calidad del agua suministrada para el consumo humano en las distintas comunidades es motivo de estudio riguroso desde ya hace varias décadas. Y es que el crecimiento de las grandes ciudades, el problema de la disposición de las aguas servidas, el vertimiento de desechos industriales a las cuencas hidrológicas, entre otras causas, han resultado en la contaminación de las fuentes de agua destinadas al consumo humano.

Este deterioro fué obviamente primero en los países industrializados. Lo que les obligó a ahondar en la búsqueda de soluciones al complejo problema, dada su gran incidencia sobre la salud y tasa de mortalidad de la población.

En América Latina el problema es relativamente reciente, pero son muy elevadas las cifras de personas fallecidas como consecuencia de enfermedades endémicas de origen hídrico.

Esto llamó muy especialmente la atención de la Organización Mundial de la Salud (OMS) quienes en un esfuerzo por contrarrestar este flagelo declararon a los años ochenta como la década del agua.

Es así como a lo largo de esos diez años se hizo un gran esfuerzo para concientizar a los latinoamericanos de la necesidad de afrontar el problema y aplicarse a encontrar sus propias soluciones.

En este orden de ideas, a través de la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y el Centro Panamericano para la Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, (CEPIS), se organizarón en varios países, seminarios y talleres con expertos en ingeniería sanitaria, procurando la mayor divulgación posible de las conclusiones de estas jornadas.

Y si bien resultan muy loables los avances logrados, también es cierto que el problema continua latente y demanda un mayor esfuerzo para llegar a garantizar la salubridad permanente del agua que consumimos.

La ciudad de Cartagena fué en dos ocasiones escenario de estos talleres de divulgación. La primera oportunidad fué en el año de 1983 y posteriormente en 1989. En ellos se

trató en especial las técnicas para la correcta operación y el mantenimiento de las plantas de tratamiento de agua.

La aplicación práctica de estos talleres se hizo evaluando estos aspectos para la planta de tratamiento número tres. Las conclusiones y recomendaciones fueron consignadas en los informes finales de curso respectivos y son fuente bibliográfica de este informe.

La planta número tres es la más moderna del acueducto de Cartagena. Para la época del primer curso, apenas tenía tres años de inaugurada. Del tipo convencional, presentaba floculadores mecánicos. En 1989, fecha del otro curso, esta planta ya había sido ampliada y modificada: los floculadores mecánicos resultaron inoperantes y hubo necesidad de cambiarlos por floculadores hidráulicos. También se optimizó el proceso de sedimentación que cambio del sistema convencional a sedimentador de placas inclinadas de alta rata.

En cambio, las plantas uno y dos no habían sido objeto de estudios similares, pese a su mayor antigüedad. Influyó tal vez el hecho de que la nueva planta entró a trabajar con una capacidad muy superior a la conjunta de las plantas uno y dos. Y ante la continua escasez del líquido a tratar, por problemas en el sistema de aducción, la

mayor atención se concentro en la planta tres.

Este proyecto tuvo por objeto principal el establecer el grado de funcionalidad de estas antiguas estructuras para tomar los correctivos que lleven a una utilización más racional de las mismas. Para llegar a esto se desarrollaron las técnicas aprendidas en el último de los talleres citados que tuvo como sede a Cartagena.

Fueron objetivos específicos del proyecto los siguientes:

- Establecer el grado de eficiencia en la potabilización del agua que se da en cada una de las plantas a evaluar.
- Caracterizar cada uno de los procesos de purificación del agua: coagulación, floculación, sedimentación, filtración, desinfección y almacenamiento verificados en las plantas uno y dos.
- Identificar los problemas y defectos de que pudieran adolecer las plantas a evaluar y que inciden sobre la calidad del agua producida.
- Estudiar el comportamiento hidráulico de las unidades de mezcla rápida, floculación, sedimentación, filtración y desinfección de estas plantas. Evaluar y, de acuerdo a los

resultados obtenidos, sugerir alternativas de operación o reformas en estructuras, que impliquen una mejora en la eficiencia.

- Determinar las condiciones de operación de las plantas uno y dos, analizarlas y rendir informe de la situación encontrada junto con las recomendaciones sugeridas para su mejora.

- Rendir informe sobre el grado de vulnerabilidad de las estructuras del acueducto y de su normal funcionamiento.

- Aprender el manejo de todos y cada uno de los equipos existentes en la Planta Potabilizadora " El Bosque " y redactar en forma detallada el Manual de Operación y Mantenimiento de la misma.

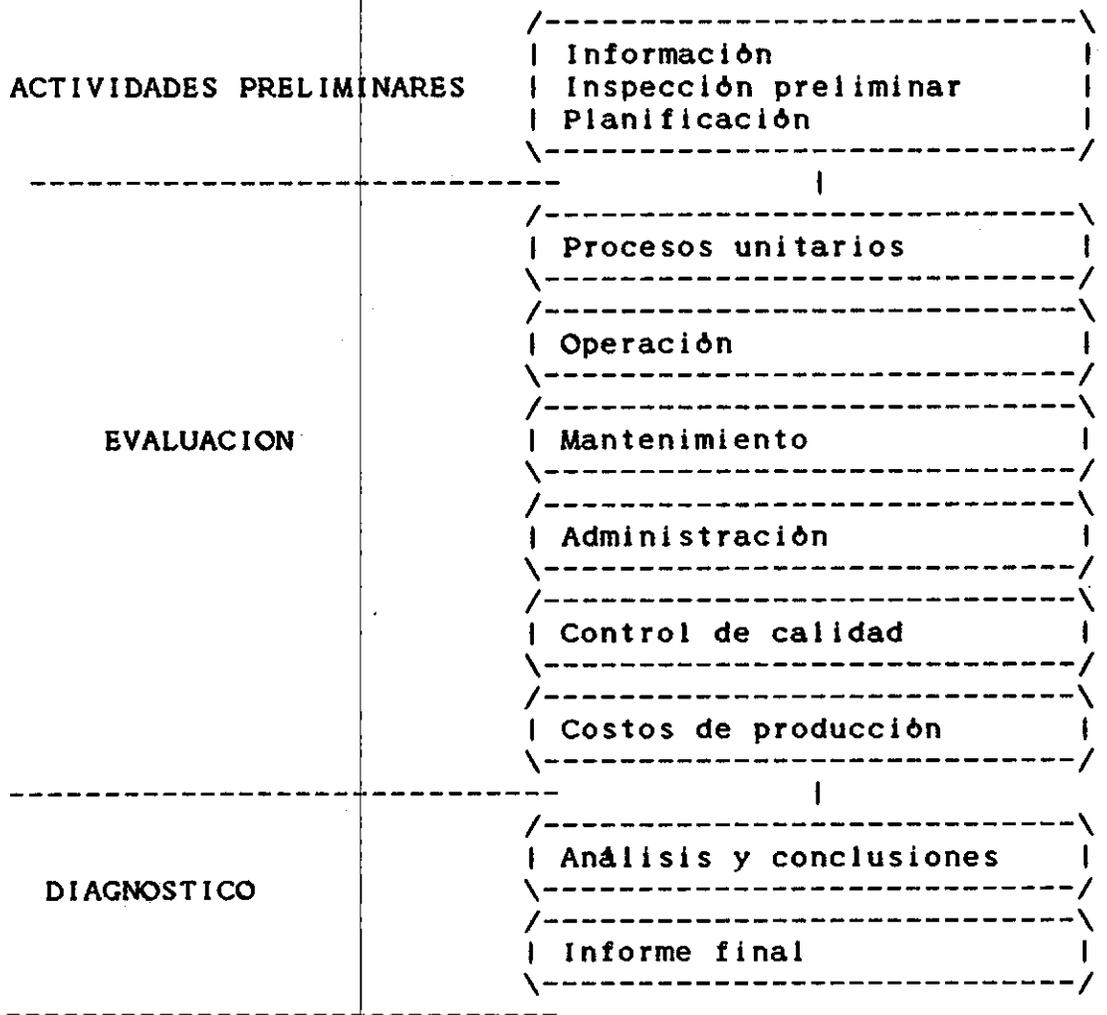
- Establecer los elementos necesarios para que la evaluación a realizar pueda ser actualizada en fechas posteriores en forma ágil y rápida.

- Recopilar y actualizar toda la información referente a la planta de tratamiento: estadísticas, planos, catálogos de equipos, etc., que se encuentra dispersa en los archivos de la misma planta y de las oficinas centrales de las Empresas Públicas.

- Organizar en coordinación con el Jefe de la planta y en sus instalaciones, un archivo y mapoteca con toda la documentación referente a la planta de tratamiento El Bosque, que aseguren un rápido acceso a la información en el momento requerido y permitan una mejor reacción ante situaciones de emergencia.

Las actividades desarrolladas se esquematizan en la Figura 1.

**FIGURA 1. Flujograma de actividades desarrolladas**



Este trabajo fue para el autor la oportunidad ideal para poner a prueba los conocimientos adquiridos en los claustros universitarios, adentrarse en el estudio de temas especializados de la ingeniería sanitaria y aprender todo lo concerniente a la operación y el mantenimiento de las plantas de tratamiento de un acueducto.

El estar en constante comunicación con los operadores y demás empleados de la planta de tratamiento; presenciar su desempeño, tanto en tareas normales como en operaciones de emergencia; y el aprender a operar los equipos existentes, es una experiencia que aporta innumerables conocimientos prácticos.

En breves palabras el trabajo comprendió:

- Análisis teórico de los procesos de tratamiento de agua.
- Determinación a nivel de laboratorio de los parámetros de comparación a utilizar en la evaluación de cada uno de los procesos.
- Ensayos en las distintas unidades de proceso para determinar la eficiencia de trabajo de cada una de ellas.
- Análisis y confrontación de resultados obtenidos.
- Formulación de conclusiones y recomendaciones.

A pesar de haber sido prevista la realización de todas estas actividades con el más minucioso criterio, debe reconocerse que no se lograron a cabalidad todos los objetivos trazados para este trabajo.

Se dejaron de tratar con la rigidez necesaria, el capítulo referente al análisis de vulnerabilidad de las instalaciones de la planta El Bosque, así como el referente a los costos de producción.

En cuanto a la redacción del Manual de Operación y Mantenimiento, se ha redactado un texto preliminar, pero todavía no está listo para ser publicado. El mismo aún requiere ser ampliado en la parte referente a procedimientos de reparaciones menores y otras medidas de mantenimiento. Con gusto se pondrá a disposición de la entidad interesada a su culminación.

De las actividades de evaluación, debe decirse que por lo limitado de los recursos con que se trabajó, no llegaron a controlarse simultáneamente todas las variables involucradas en cada proceso de tratamiento. Así, la mayor parte de comparaciones debió hacerse sobre la turbidez y el color de las muestras de agua, dejando de lado el control de parámetros no menos importantes, como el pH y la alcalinidad. Además se trató solo con la calidad de

agua predominante en los meses de Diciembre y Enero. Lo deseable habría sido poder simular mediante mezclas de agua proveniente de Dolores y de la de Gambote, las distintas calidades de agua que se presentan durante las otras épocas del año.

No obstante lo anterior, se trabajó con todo el empeño y la dedicación necesaria, para que las observaciones y conclusiones resultantes reflejaran lo más fiel posible las condiciones existentes en las plantas evaluadas.

## 2. DESCRIPCION DE LA CIUDAD DE CARTAGENA

La ciudad de Cartagena de Indias. Actual capital del departamento de Bolívar y sede de los complejos turísticos e industrial más grandes del país, esta ciudad costera ha sido en los últimos años la más promisoría por las grandes facilidades que ofrece para el desarrollo de múltiples actividades.

### 2.1 GENERALIDADES

Localizada a 5 m sobre el nivel del mar, a  $10^{\circ} 10'$  de latitud Norte y  $75^{\circ} 32'$  de longitud Oeste, se encuentra a las orillas de la bahía de su mismo nombre, que le brinda las ventajas de su amplia y abrigada rada.

Está acentada la ciudad sobre un grupo de islas y penínsulas separadas por cuerpos de agua navegables que le auguran un desarrollo futuro como ciudad Venecia.

De topografía plana, excepto la elevación del Cerro de la

Popa (150 m) y las lomas del Marión y del Diamante, ofrece un clima cálido tropical constantemente refrescado por las brisas marinas (Vientos Alisios). La temperatura media es de 28°C, humedad relativa de 66% y pluviosidad media anual de 870 mm en dos períodos bien distinguidos de lluvias (Abril - Mayo y Septiembre - Noviembre). Aloja a una población estimada en 600.000 habitantes y una población flotante (turistas) de aproximadamente 10.000 personas.

Es sede de cuatro universidades de prestigio: La Universidad de Cartagena, la Universidad Jorge Tadeo Lozano, la Corporación Tecnológica de Bolívar y la escuela Naval Almirante Padilla, centros donde se imparte formación en más de 12 disciplinas profesionales. Así mismo la formación primaria y secundaria es cubierta por colegios privados y oficiales.

Es puerto marítimo y fluvial por desembocar en la bahía el Canal del Dique. Por el muelle de Cartagena se embarca y recibe gran parte del comercio internacional de Colombia y dadas las condiciones de la bahía pueden atracar en ella buques de gran calado. No obstante no se cuenta todavía con las estructuras necesarias para el eficiente manejo de contenedores de mercancías que es la modalidad que está imponiéndose en el comercio internacional de carga. Es necesario además encontrar la forma de racionalizar el

tránsito de vehículos pesados dentro de la ciudad.

Cuenta Cartagena también con un aeropuerto internacional en magnificas condiciones, capaz de recibir aviones de gran envergadura, siendo servido por aereolíneas nacionales y extranjeras. Es también asiento de la base naval más importante de la Armada Nacional sobre el Atlántico.

Los servicios públicos son prestados por entidades oficiales independientes a saber: Electrificadora de Bolívar (energía); Empresas Públicas Municipales (acueducto, alcantarillado, recolección de basuras, arbolización); Telecom y Telecartagena (telefonía); Surtigas (gas natural en red domiciliaria).

## 2.2 DESARROLLO INDUSTRIAL

Hoy en su zona industrial de Mamonal alberga a más de 50 industrias entre las que se cuenta la refinería de petróleos de Ecopetrol, industrias del sector petroquímico, metalúrgico y otras. Estas han encontrado en el abrigo de la bahía y su comunicación con el río Magdalena por el Canal del Dique las facilidades portuarias que requieren.

La existencia de la Zona Franca con facilidades adicionales para las empresas que allí se encuentran, promueven la producción de bienes manufacturados destinados a la exportación.

Actualmente se están haciendo grandes inversiones en la zona de Mamonal. Entre estas pueden citarse: El muelle de contenedores de la Flota Mercante Grancolombiana; la maltería de Bavaria; la Siderurgica del Caribe; programas de ensanche en las plantas de Colclinker, Alcalis y Abocol.

### **2.3 DESARROLLO TURISTICO Y COMERCIAL**

Cartagena, por la hermosura de su bahía, sus playas y sus reliquias arquitectónicas se ha convertido en sitio obligado de visita para turistas nacionales y extranjeros; y para servir esta demanda la ciudad cuenta con toda una infraestructura de servicios y atenciones brindados por más de 60 establecimientos hoteleros; restaurantes, discotecas, casinos, centros comerciales, joyerías, casas de modas, teatros, recintos para congresos etc..

Cartagena está incluida entre los puertos de los cruceros turísticos del Caribe a los cuales brinda las facilidades de su nuevo muelle turístico.

Es además el punto de reunión de innumerables congresos y convenciones de gentes dedicadas a las más diversas actividades. Adicional a las facilidades que les ofrecen los hoteles, encuentran en el moderno Centro Internacional de Convenciones de Cartagena de Indias el lugar perfecto para estos eventos.

Paralelo con el desarrollo del turismo ha crecido en cantidad y diversidad la actividad comercial de la ciudad. Son puntos de intenso comercio la zona turística de Bocagrande, el centro amurallado de la ciudad y el sector de Bazurto. Ultimamente han surgido diversos centros comerciales a lo largo de la Avenida Pedro de Heredia y en la periferia de la ciudad creandose nuevos polos de desarrollo.

Cartagena es también rica en expresiones culturales. Cuenta con innumerables galerías de arte, salas de teatro y tertulias, conferencias abiertas al público sobre los más diversos temas, museos religiosos e históricos y la imponentia de sus monumentos y reliquias arquitectónicas.

Anualmente se celebran en la ciudad los siguientes eventos: Feria Taurina, Fiestas de Nuestra Señora de la Candelaria, Festival del Frito, Festival de Música del Caribe, Festival Internacional de Cine de Cartagena,

Reinado Nacional de la Belleza y Fiestas de Noviembre (carnaval).

#### 2.4 RESEÑA HISTORICA

Fundada por Don Pedro de Heredia en 1533, fué puerto de principal orden durante la colonia, para el embarque hacia Europa de las riquezas provenientes del interior del país y del resto de colonias sudamericanas de España.

Este hecho la tornó en el objeto de codicia de piratas ingleses, por lo que fué fortificada con un cordón de murallas y otras estructuras militares que aún perduran. Estas fortificaciones y la arquitectura de la época colonial le merecieron a la ciudad la declaración de Patrimonio Histórico de la Humanidad en 1983 por parte de las Naciones Unidas.

Fué ciudad precursora de la gesta de independencia por lo que fué sitiada por Pablo Morillo en 1815, sitio que resistió con valentía y le valió el título de Ciudad Heroica.

Testigo de múltiples acontecimientos de la historia del país la ciudad vio estancado su desarrollo por mucho tiempo para luego reasumir poco a poco su papel de liderazgo en el progreso a partir de la instalación en

Mamonal de la Refinería de Ecopetrol, la reactivación de su puerto y su inicio como centro recreacional.

En este momento la ciudad se encuentra en un auge de crecimiento debido a las grandes inversiones que se están haciendo en la zona industrial de Mamonal y al surgimiento de nuevos polos de desarrollo a saber:

- La culminación de la nueva carretera entre Cartagena y Barranquilla y el anillo vial de Cartagena. Esta nueva vía reduce a 1 hora el tiempo de viaje entre las dos ciudades y ha propiciado la urbanización a lo largo de la misma y el aprovechamiento de playas vírgenes.

- La intención del gobierno municipal de urbanizar la isla de Tierra Bomba y construir un puente o viaducto que la comunique con la península de Bocagrande.

- El surgimiento de centros comerciales y barrios residenciales en puntos periféricos de la ciudad.

- El dragado y revitalización de los cuerpos de agua internos de la ciudad. Este repunte en el desarrollo de la ciudad ha puesto de manifiesto la precaria cobertura de servicios públicos en la misma por lo que se está tratando de dar soluciones rápidas en estos aspectos.

## 2.5 ESTADO DE SALUBRIDAD DE LA CIUDAD

Al igual que en otras regiones del país, los servicios de salud ofrecidos por el estado son muy deficientes. Apenas se imparte la atención básica pero con muy poca cobertura.

Esta deficiencia estuvo aliviada hasta hace unos años por los servicios del Hospital Universitario de la Universidad de Cartagena, localizado en el sector de Zaragocilla. Este hospital después de tener cobertura regional ha visto reducido su campo de acción por problemas de presupuesto.

No obstante la Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad de Cartagena en sus modernas instalaciones de Zaragocilla, cumple una gran labor al formar nuevos médicos, odontólogos, enfermeras y farmaceutas que irradian sus servicios en la ciudad.

Pero la verdad es que a pesar de los nuevos centros de salud y clínicas especializadas existentes en la ciudad, las gentes que no gozan de los servicios de agua y alcantarillado, tampoco tienen acceso a la salud por tratarse de personas muy pobres que habitan asentamientos subnormales. Es entre esta población donde proliferan las principales enfermedades de origen hídrico que se contabilizan en la ciudad.

Otra parte de estas enfermedades surgen por la falta de continuidad del servicio de agua y presentarse inadecuados manejos de almacenamiento dentro de las residencias.

**2.6 ESTADO DE LOS SERVICIOS PUBLICOS**

**2.6.1 Acueducto.** La ciudad empezó a abastecerse a partir del año 1904 con las aguas de Matute, acuífero existente en las lomas al nororiente de la población de Turbaco.

En el año de 1938 se puso en servicio el Acueducto en la loma del Paraguay (lugar que hasta hoy ocupa), con la construcción de la planta No. 1 y agua traída desde la población de Gambote tomada en el Canal del Dique.

En 1968 se construyó la planta No. 2 de las mismas características de la ya existente.

En 1981 se construyó la nueva planta del acueducto (planta No. 3) y se incorporó al mismo la conducción proveniente de la ciénaga de Dolores.

En 1986 se ampliaron las instalaciones de la planta No. 3. Estas tres plantas actualmente tienen una capacidad instalada de 8.750 m<sup>3</sup>/h (210.000 m<sup>3</sup>/día) de los cuales se tratan en promedio 7.000 m<sup>3</sup>/h por deficiencias en el

sistema de aducción.

Esta capacidad instalada tendría una cobertura aceptable hasta el año 1990 para una población estimada en 651.256 habitantes, pero ha resultado insuficiente.

El servicio es administrado por las Empresas Públicas Municipales. Estos tienen unos 75.000 suscriptores del servicio de agua potable para una cobertura del 74%.

**2.6.2 Alcantarillado.** La red de alcantarillado existente en la ciudad en su mayoría es por gravedad. La primera etapa del mismo fué construído en 1968 y desde entonces vienen haciendose ampliaciones para llegar hoy a una cobertura del 54% con unos 43.500 suscriptores aproximadamente.

Debido a lo plano de la topografía de la ciudad se cuenta con 15 estaciones de bombeo y los colectores principales descargan las aguas servidas en la bahía de Cartagena y en la Ciénaga de la Virgen.

En la actual administración se ha ampliado su cobertura al ensayarse el sistema de construcción en asocio con las comunidades con lo que se estima la cobertura alcanzará el 80% de la población.

Ahora se está tratando de encontrar una solución definitiva al vertimiento de estos desechos para evitar la contaminación de la bahía y la cienaga. Las Empresas Públicas tienen proyectada la construcción de una serie de lagunas de oxidación y de un colector interceptor que lleve estas aguas hasta las lagunas. Otra solución prevista es la de un emisario submarino, que vertería las aguas negras a unos cinco kilómetros mar adentro. La solución mediante la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales ha sido descartada inicialmente por la alta inversión inicial que implicaría.

**2.6.3 Energía eléctrica.** El servicio es administrado por la Electrificadora de Bolívar S.A., quien a su vez compra la energía a la Corporación Eléctrica de la Costa (CORELCA).

Este servicio tiene tarifas superiores a las existentes en las ciudades del interior del país, pues al ser de origen termoeléctrico resulta en mayores costos que la de origen hidroeléctrico.

Este sistema eléctrico a nivel de la costa es insuficiente por lo que está conectado al sistema nacional de interconexión eléctrica por medio de la línea de 500 KV de Sabanalarga a San Carlos.

Debido a lo vulnerable de esta conexión ante el ataque dinamitero de grupos extremistas, el sistema eléctrico de la costa es muy inestable y se ve sometido con frecuencia a severos racionamientos.

La cobertura de energía eléctrica en la ciudad es aproximadamente del 73 % correspondiente a 70.115 suscriptores de los que el 92% corresponde a instalaciones residenciales.

La electrificadora también sirve a las estaciones de bombeo de las Empresas Públicas en Gambote, Dolores, Piedrecitas y Albornoz.

2.6.4 Telefonía. El servicio es prestado por Telecom y Telecartagena. Existen actualmente aproximadamente 20.000 líneas telefónicas, con seis centrales telefónicas de Telecartagena, para servir a 13.500 abonados residenciales, 6.500 comerciales y 500 teléfonos públicos.

Se tiene también a través de Telecom un buen servicio de comunicaciones vía satélite con cualquier lugar del mundo, servicio costa - barco -costa, discado directo nacional e internacional, etc..

## 2.7 DEMANDA Y CONSUMO DE AGUA DE LA CIUDAD

Cuando se inauguró el acueducto en 1938 la producción de agua tratada fué de 4.000 m<sup>3</sup>/día con 3.500 suscriptores. En 1948 se producían 11.000 m<sup>3</sup>/día para 6.200 suscriptores; en 1950 , 20.000 m<sup>3</sup>/día y en 1960, se trataban 50.000 m<sup>3</sup>/día.

En 1981 se compró la conducción del sistema Dolores a la Planta de Soda y se construyó la planta No. 3 con lo que la producción diaria subió a 150.000 m<sup>3</sup>. Al deteriorarse y salir de servicio la conducción de acero de 0,76 m ( 30 pulgadas) de diámetro, proveniente de Gambote la producción se redujo a 120.000 m<sup>3</sup>/día.

En 1986 con la ampliación de la planta No. 3 la capacidad instalada fué de 210.000 m<sup>3</sup>/día, pero por problemas de bombeo sólo se tratan 170.000 m<sup>3</sup>/día.

La población actual de la ciudad se estima en 700.000 habitantes proyectando los datos del censo de Octubre 15 de 1985, en el cual la población total de la ciudad fue de 531.426 habitantes.

De otra parte el consumo de agua por habitante se estima es de 270 lts/hab/día. Así el consumo diario requerido por la ciudad es de:

$$270 \text{ lts/hab/día} \times 700.000 \text{ hab} = 189.000 \text{ m}^3/\text{día}$$

Lo anterior supone que el actual sistema de acueducto no alcanza a suministrar el agua para consumo doméstico requerida por la ciudad.

### 3. DESCRIPCION GENERAL DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

#### 3.1 SISTEMA DE ADUCCION DEL ACUEDUCTO DE CARTAGENA

El agua tratada por el acueducto de Cartagena proviene en su totalidad del Canal del Dique, brazo de desembocadura del rio Magdalena.

La captación se hace en dos puntos distintos a saber: En la bocatoma de Gambote en la margen derecha del Canal del Dique, y en el sistema lagunar Juan Gómez - Bohorquez - Dolores, también alimentada por el Canal del Dique.

3.1.1 Reseña historica del canal del Dique. Este brazo de la desembocadura del rio Magdalena fué construído por los españoles en el siglo XVII para comunicar el puerto de Cartagena con el interior del pais a traves del rio.

En el trazado como se le conoce hoy, data del año 1930 y ha sido objeto de posteriores rectificaciones y

ampliaciones. Tiene por puntos extremos a los pueblos de Calamar y Pasacaballos, con una longitud de 110 Km.

En su recorrido alimenta una serie de ciénagas como las de Capote, Tupé, la Cruz, Juan Gómez, María la Baja y Palotal. Desemboca por diversos brazos en las bahías de Barbacoas y de Cartagena.

Durante el verano, al bajar sus niveles se introducen tajadas de agua de mar curso arriba del canal aumentando el contenido de cloruros del agua, por lo que no resulta práctico ubicar las bocatomas en la parte final de dicho canal.

El sistema de ciénagas conformado por las denominadas de Juan Gómez, Bohorquez y Dolores, es la otra fuente de toma de agua del acueducto. Tienen una extensión de 3.000 Ha y una capacidad de almacenamiento de 30 a 35 millones de metros cúbicos. Se alimentan por gravedad en la secuencia antes enunciada durante el invierno y durante el verano se hace necesario bombear desde la ciénaga Juan Gómez a la de Dolores.

Se tiene proyectado y próximamente se empezará a construir un canal que comunique estas dos ciénagas y eviten el bombeo requerido en el verano.

### 3.2 CAPTACION Y CONDUCCION DEL AGUA CRUDA

El sistema de captación y conducción de agua cruda del acueducto de Cartagena consta de dos bocatomas independientes, distinguidas como la de Gambote y la de Dolores.

**3.2.1 Captación en Gambote.** Está localizada en la población del mismo nombre a unos 40 kilómetros de Cartagena sobre la Carretera Troncal de Occidente.

La captación se hace mediante una dársena lateral sobre la margen derecha del Canal del Dique. La dársena tiene dimensiones 150 m x 40 m x 3,5 m y funciona como estructura del control de sobrenadantes y como desarenador. El dragado de la misma se hace anualmente, extraiendose aproximadamente 15.000 m<sup>3</sup> de sedimentos.

La Casa de Bombas consta de seis (6) bombas verticales las cuales tienen las siguientes características:

Bomba No. 1

Marca: Vertiline Aurora Pump 28 SK

Q = 50.000 m<sup>3</sup>/día

H = 160 m

w = 1.170 rpm

N = 85%

P = 1.500 H.P.

US. Motor

V = 4.160 voltios.

Esta unidad trabaja independiente por la tubería de acero de 0,76 m ( 30 pulgadas ) de diámetro, pero al fallar ésta tubería quedó fuera de servicio la bomba correspondiente.

Bombas No. 2 y 3

Marca: Sulzer BPK H2

Q = 15.000 m<sup>3</sup>/día

H = 103 m

Motor Browboveri

P = 335 H.P.

V = 440 voltios

N = 84%

w = 1.150 rpm

Están en buen estado, pero funciona sólo una por insuficiencia eléctrica en la estación de Gambote.

Bombas No. 4 y 5

Marca: Sulzer BPK 50

Q = 34.000 m<sup>3</sup>/día

H = 103 m

Motores Oerlikon

P = 600 H.P.

V = 4.160 voltios

N = 85%

w = 1.150 rpm

Se encuentran en buen estado.

Bomba No. 6

Marca Worthington 14 QL - 18

Q = 34.000 m<sup>3</sup>/día

H = 103 m

Motor Siemens

P = 670 H.P.

V = 4.160 voltios

N = 84%

w = 1.170 rpm

Estas estructuras datan del año 1938 cuando se construyó la planta de tratamiento número uno del acueducto. Se tuvo hasta 1965 una sola tubería de 46 Kms de longitud entre la estación Gambote y la Planta de Filtros El Bosque. En 1965 se instaló y puso en servicio una tubería de acero de 0,76 m ( 30 pulgadas) de diámetro, paralela a la ya existente.

Al ponerse en servicio la planta No. 2 en 1968 el bombeo se hizo insuficiente por lo que se instaló la bomba No. 1 en Gambote para que descargara 60.000 m<sup>3</sup>/día por la nueva tubería.

Esta tubería resultó sobrecargada por lo que se deterioró rápidamente. Entonces se cortó y sacó del servicio entre las abscisas K5+000, donde está hoy la estación de Albornoz, y la abscisa K37+500.

La estación de Gambote bombea actualmente unos 45.000 m<sup>3</sup>/día de los cuales entrega 12.000 m<sup>3</sup>/día al acueducto de Arjona mediante una derivación en Corralito a través del tramo restante de la tubería de acero (entre abscisas K37+500 y K46+000). Se pierden unos 3.000 m<sup>3</sup>/día en la ruta y llegan a la planta de filtros unos 30.000 m<sup>3</sup>/día.

La estación es alimentada por energía a 13.200 V y es

transformada a 4.160 V (mediante un transformador de 2,5 MVA) y a 440 voltios (transformador de 630 KVA).

La energía proviene de la subestación eléctrica de Gambote (66 KV/13.2 KV) la cual es alimentada por la subestación Ternera mediante línea de 66 KV. El consumo en Gambote es de unos 500.000 Kw-h/mes.

**3.2.2 Captación de Dolores.** Las Empresas Públicas en 1980 adquirieron el sistema de Acueducto de Dolores que poseía la Planta de Soda de Colombia para sus instalaciones en Mamonal.

Este acueducto estaba conformado por la estación de bombeo de Conejos; el sistema lagunar Juan Gómez - Bohorquez - Dolores; la estación de bombas de Dolores; y la conducción forzada de 1,14 m (45 pulgadas) de diámetro en Tubería American Pipe y 30 Km de longitud hasta la Planta de Soda. Desde allí se instalaron 7 Km de Tubería American Pipe de 0,91 m (36 pulgadas) de diámetro hasta la planta de tratamiento en el barrio El Paraguay.

En 1980 se puso en servicio la estación de rebombeo llamada Albornoz (Km 32) y posteriormente la estación de rebombeo de Piedrecitas (Km 20) para completar el sistema actual.

**3.2.2.1 Estación de Conejos.** Esta estación consta de cuatro bombas agrícolas con capacidad de bombeo de 1,5 m<sup>3</sup>/s cada una y accionada por motores siemens de 72 H.P. Esta estación solo trabaja durante el verano (Enero a Mayo).

Hasta el año 1989 la energía eléctrica requerida era generada con dos plantas Diesel de 135 Kw cada una. Estas fueron reemplazadas recientemente por una línea eléctrica a 13.200 voltios (línea Rocha - Conejos) de 9 Km de longitud y que es transformada en Conejos a 440 voltios por un transformador de 630 KVA.

La energía proviene del sistema Gambote - Arjona - Rocha y permite operar las cuatro bombas simultáneamente y en forma continua. El agua cruda bombeada o por gravedad, entra en el sistema lagunar y se clarifica antes de llegar a la estación de Dolores.

**3.2.2.2 Estación de Dolores.** La estación de Dolores se recibió con tres bombas; en 1987 las Empresas Públicas compraron y pusieron en servicio la bomba No. 4 ; y en el año 1989, las unidades No. 5 y 6. Existen entonces los siguientes equipos:

Bombas No. 1, 2, 3 y 4

Marca: Line Bowler - Aurora Pump

Q = 83.800 m <sup>3</sup> /día		H = 93.5 m
Motores General Electric (son 3)		P = 1.500 H.P.
V = 4.160 voltios	N = 85%	w = 1.150 rpm
Motor US Motor	H = 93.5 m	
V = 4.160 voltios	N = 85%	w = 1.180 rpm

Los cuatro están conectados por un múltiple a la tubería de 1,14 m (45 pulgadas de diámetro) y pueden trabajar simultáneamente tres (3) unidades para producir un caudal total de 240.000 m<sup>3</sup>/día. La otra unidad permanece en reserva.

El funcionamiento de estas unidades actualmente depende mucho de los niveles de trabajo (1,00 m - 2,40 m). Este problema será solucionado al poder bombear permanentemente en la estación de Conejos y al concluirse los trabajos de construcción del canal Juan Gómez - Dolores.

**3.2.2.3 Estación de Piedrecitas.** Esta estación de rebombeo está ubicada en el Km 20+000. Consta de seis (6) bombas de las siguientes características:

Marca: Ebara modelo 450 x 300 CNJ

Q = 49.248 m<sup>3</sup>/día      H = 72 m

Motores Jaskawa      560 Kw

V = 4.160 voltios      N = 85%      w = 1.170 rpm

Todas están en buen estado y bombean 240.000 m<sup>3</sup>/día trabajando cinco (5) unidades simultáneamente.

La estación tiene un embalse de aproximadamente 5.000 m<sup>3</sup> de agua que es rebombada hasta la estación de Albornoz. Entre las estaciones de Piedrecitas y Albornoz se hace la derivación para el consumo de la zona industrial de Mamonal. Este consumo es de aproximadamente 60.000 m<sup>3</sup>/día.

3.2.2.4 Estación de Albornoz. Esta estación hace el rebombeo en los 5 Km finales hasta la planta de tratamiento. Tiene instaladas cinco bombas con una capacidad máxima de 180.000 m<sup>3</sup>/día así: 130.000 m<sup>3</sup>/día por la tubería American Pipe (A.P.) de 0,91 m (36 pulgadas) y los restantes 50.000 m<sup>3</sup>/día utilizando el tramo final de la tubería de acero de 0,76 m (30 pulgadas) que venía de Gambote. Este tramo de tubería presenta frecuentes daños por lo que se hace necesario su reemplazo.

Las bombas instaladas son:

Marca: Aurora Pump 24 EH

- Q = 30.000 m<sup>3</sup>/día                      H = 70 m
- Motores General Electric              P = 400 HP
- V = 4.160 voltios                        N = 85%                      w = 1.170 rpm

Bomba No. 4

Marca: Peerless HxB

Q = 30.000 m<sup>3</sup>/día

H = 70 m

Motor U.S. motor

P = 800 HP

V = 4.160 voltios

N = 85%

w = 1.170 rpm

Bomba No. 5

Marca: Aurora 30 KL/Z

Q = 60.000 m<sup>3</sup>/día

H = 70 m

Motor U.S. motor

P = 800 H.P.

V = 4.160 voltios

N = 85%

w = 1.170 rpm

Estas bombas están todas en buen estado.

**3.2.2.5 Estación eléctrica del ALCO.** Regula toda la energía necesaria para las estaciones de Dolores, Piedrecitas y Albornoz. Allí se recibe la energía procedente de la subestación Ternera a 13.800 v, se suministra a 13.800 v a la estación de Albornoz por una línea de 5 Km de longitud y se transforma y suministra a 34.500 v a las estaciones de Dolores y Piedrecitas en línea de 30 Km de longitud.

Los consumos promedio son los indicados en la Tabla 1.

**TABLA 1.** Consumo de energia en estaciones de bombeo.

<b>Estación</b>	<b>Consumo Kw-h/mes</b>
Dolores	1.650.000
Piedrecitas	1.600.000
Albornoz	900.000

### 3.3 PLANTA DE TRATAMIENTO

La planta de tratamiento del acueducto de Cartagena, denominada Planta de Filtros El Bosque, consta de tres plantas de tratamiento convencionales ubicadas en la parte alta del barrio El Paraguay.

Está situada sobre la cota 47,0 m y abastece por gravedad a gran parte de la ciudad. Se reciben diariamente 170.000 m<sup>3</sup> de agua cruda para su tratamiento. Esta proviene en un 20% de Gambote y el resto de Dolores. La mezcla se realiza en dos tanques de compensación a la llegada a la planta. De allí se distribuye hacia las distintas plantas así:

	Capacidad máx.	Capacidad normal
Planta uno	45.000 m <sup>3</sup> /día	35.000 m <sup>3</sup> /día
Planta dos	45.000 m <sup>3</sup> /día	35.000 m <sup>3</sup> /día
Planta tres	120.000 m <sup>3</sup> /día	100.000 m <sup>3</sup> /día

El tratamiento básico consiste en la remoción de turbiedad, color y posteriormente el proceso de desinfección. Esto se logra utilizando sulfato de aluminio Tipo B como coagulante y cloro gaseoso como desinfectante. En promedio se consumen mensualmente 200 toneladas de sulfato de aluminio y 12 toneladas de cloro gaseoso.

Las plantas uno y dos son las más antiguas y son muy similares. Operan con una misma cámara de mezcla rápida. La planta tres es la más grande y moderna.

Tienen en común los siguientes reactores o unidades: cámara de mezcla rápida, cámara de coagulación, tanques de sedimentación, unidad de filtración y cámara de desinfección.

57148

### 3.4 ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCION

El acueducto de Cartagena tiene cuatro tanques de almacenamiento: dos tanques dentro de las instalaciones de la planta de filtros, denominados 1 y 2, de 9.000 y 8.000 m<sup>3</sup> de capacidad cada uno; y los tanques de compensación de El Carmelo y Nariño con capacidad de 5.000 y 10.000 m<sup>3</sup> respectivamente.

El tanque de compensación de El Carmelo ha servido para reforzar la zona suroriental de la ciudad mejorando el servicio en barrios como El Carmelo, La Consolata, El Socorro, San Fernando, San Pedro, Trece de Junio, Santa Lucía, La Victoria, Ternera, El Recreo, La Concepción, Blas de Lezo y otros.

El tanque de Nariño ha servido para mejorar el servicio a los barrios altos de la ciudad y ha provisto la presión suficiente para la nueva red del acueducto del sector de Bocagrande.

El sistema de distribución tiene unos 550 km de longitud con las siguientes características.

- 100 km de tubería de hierro fundido instalados entre los años 1938 y 1951. Se encuentran muy deteriorados.
- 25 km en tubería de concreto con cilindro de acero.

- 300 km en tubos de asbesto - cemento.
- 125 km de tubería de P.V.C.

El sistema de distribución es reforzado por las estaciones de bombeo de Blas de Lezo, El Carmelo y Bocagrande.

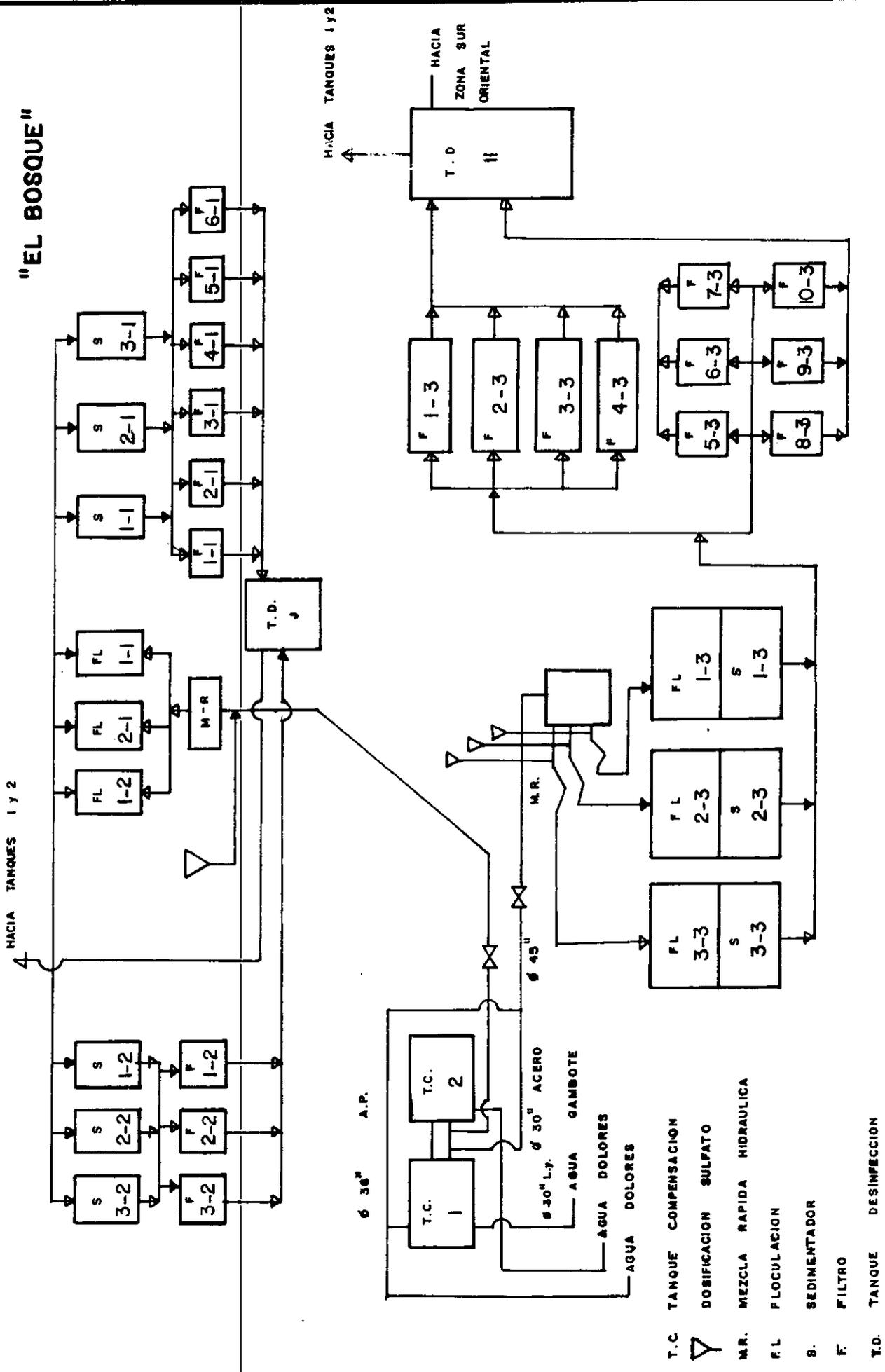
#### 4. DESCRIPCION GENERAL DE LA PLANTA POTABILIZADORA EL BOSQUE

Planta potabilizadora de aguas "El Bosque" es el nombre con el que se designa a las instalaciones de las E.E.P.P.M.M. en el barrio el Paraguay. También llamada Planta de Filtros, aloja al vivero del departamento de Parques y Arborización de las E.E.P.P.M.M. y a las tres plantas de tratamiento de agua con que cuenta el Acueducto de Cartagena.

A continuación presentamos un recuento pormenorizado de las estructuras y elementos que constituyen las plantas No. 1 y No. 2, por ser éstas el objeto de evaluación.

La Figura 2 muestra un esquema del funcionamiento de las estructuras que componen la planta de tratamiento "El Bosque".

FIGURA 2. ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS "EL BOSQUE"



#### 4.1 DESCRIPCION DE LA PLANTA UNO

La planta de tratamiento número uno del acueducto de Cartagena fué construída en el año de 1938 por la firma norteamericana Raymond Concrete Company, Ingenieros contratistas con sede en la ciudad de Nueva York.

En los archivos de las Empresas Públicas no se encuentran memorias técnicas de la obra. Se cuenta si con un juego de los planos correspondientes, en los que se detallan además de las estructuras propias de la planta, las estructuras de captación en Gambote, los perfiles de la tubería de aducción hasta la planta y la red de distribución de agua potable para la ciudad de ese entonces.

Esta primera planta consta de las siguientes estructuras: Tanques de compensación para recibir el agua proveniente de Gambote, cámaras de mezcla o floculador, tres tanques sedimentadores, seis unidades de filtración, seis aereadores, sistema de cloración, tanque de reserva de agua filtrada y tanque de agua para lavado.

Estas estructuras han sido objeto de varias modificaciones siendo la más notoria la eliminación de los aereadores, la adición de otro floculador, la unidad de mezcla rápida

conjunta para las plantas uno y dos; y la cámara de desinfección.

4.1.1 Tanques de compensación. Existen actualmente dos tanques de compensación a los que llega el agua cruda por tres tuberías. La conducción con agua de Gambote, de 0,91 m (36 pulgadas) de diámetro y tubos de concreto; y la conducción con agua de Dolores: un tubo American Pipe de 0,91 m (36 pulgadas) de diámetro y otro de hierro fundido de 0,76 m (30 pulgadas) .

El tanque de compensación No. 1, construido en 1938, tiene dimensiones de 38 m x 16 m x 2,8 m de altura y un volumen útil de 1.700 m³. A este tanque entra por el fondo la conducción de Gambote y en la parte superior descargan dos derivaciones de la conducción de Dolores.

El tanque de compensación No. 2, construido en 1958, tiene por dimensiones 21,6 m x 21,6 m x 3,0 m de profundidad media. En el descarga sólo la conducción de Dolores mediante dos derivaciones de 0,76 m de diámetro. Todavía se encuentra instalado en este tanque, un múltiple de cinco tubos de 0,30 m de diámetro con 17 boquillas cada uno, que servían de aereadores a la instalación original de llegada del agua. Este sistema fué eliminado hace varios años.

Normalmente el agua cruda de el tanque No. 1 presenta gran turbidez a diferencia de la apariencia cristalina del agua en el tanque No. 2 que proviene únicamente de Dolores.

Ambos tanques cuentan con su sistema de rebose pero no tienen válvulas de fondo que permitan su drenado para actividades de limpieza.

Sobre el tanque No. 1 también descarga la tubería de 0,20 m ( 8 pulgadas) de diámetro del sistema de recirculación del agua de lavado de filtros.

En el espacio entre los tanques de compensación se encuentra la cámara de recolección. A ella pasa el agua al rebosar sobre aberturas laterales en los tanques y que pueden usarse como vertederos para cuantificar el flujo.

En esta cámara se mezclan las aguas y salen por dos tubos de diámetro 1,07 m (42 pulgadas), provistos de válvulas de compuerta, con los que se regula el caudal a tratar en cada planta. Una salida alimenta a las plantas uno y dos y la otra a la planta tres.

El tubo que alimenta a las plantas uno y dos pasa por una cámara o registro donde cambia de diámetro; de dicha cámara sale el tubo con diámetro de 0,76 m (30 pulgadas)

en hierro fundido.

Esta tubería al pasar frente a la planta dos presenta un registro para pitometría, es decir, una válvula de incorporación de una pulgada que permite la instalación de un medidor de flujo. Un poco más adelante presenta una reducción en el diámetro de 0,76 m a 0,61 m y luego un medidor tipo Venturi. Este medidor enviaba sus señales al tablero de medidores ubicado en el piso de operaciones de la planta tres, pero ya hace años que este último está fuera de servicio.

El tubo de alimentación a las plantas uno y dos sigue en tubería de 0,61 m y antes de entrar a la cámara de mezcla rápida presenta una válvula de mariposa.

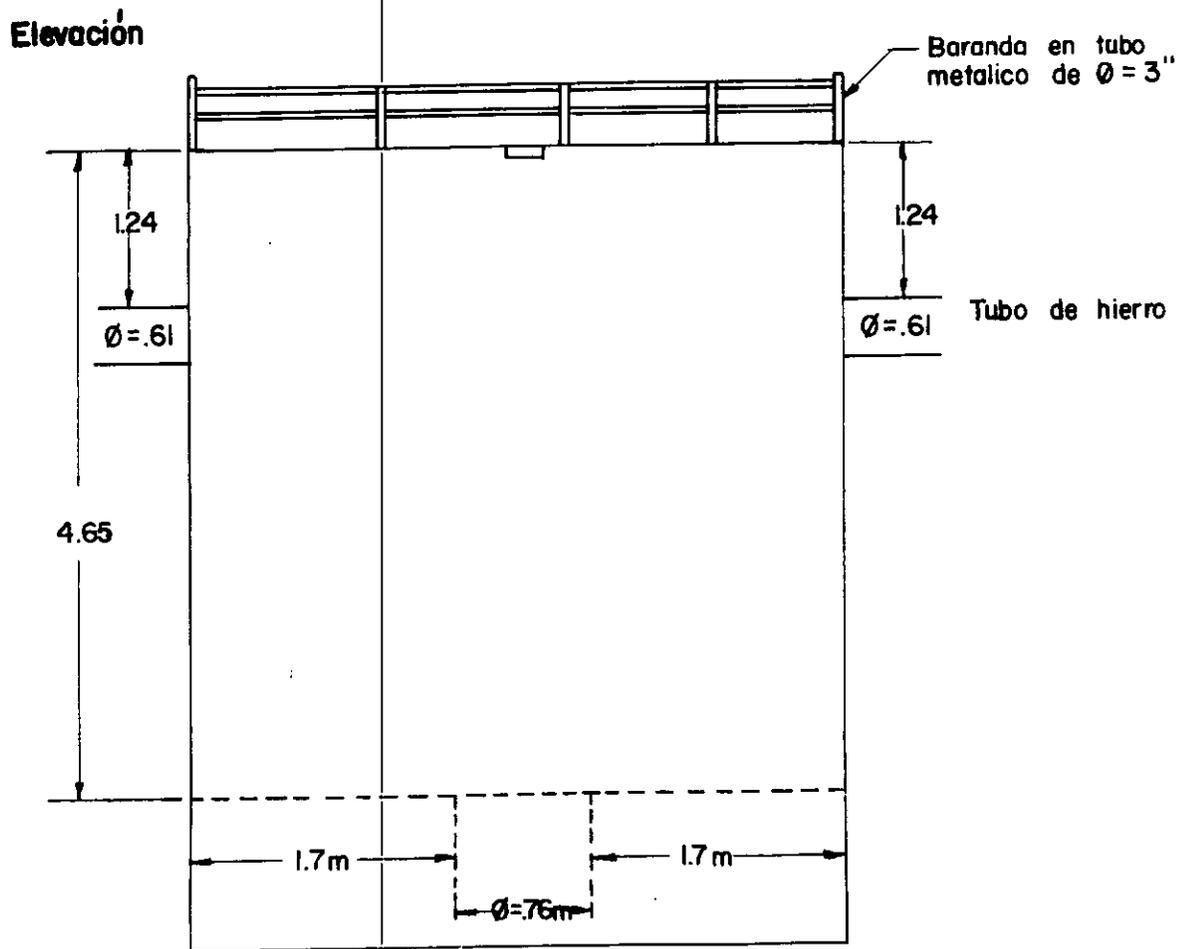
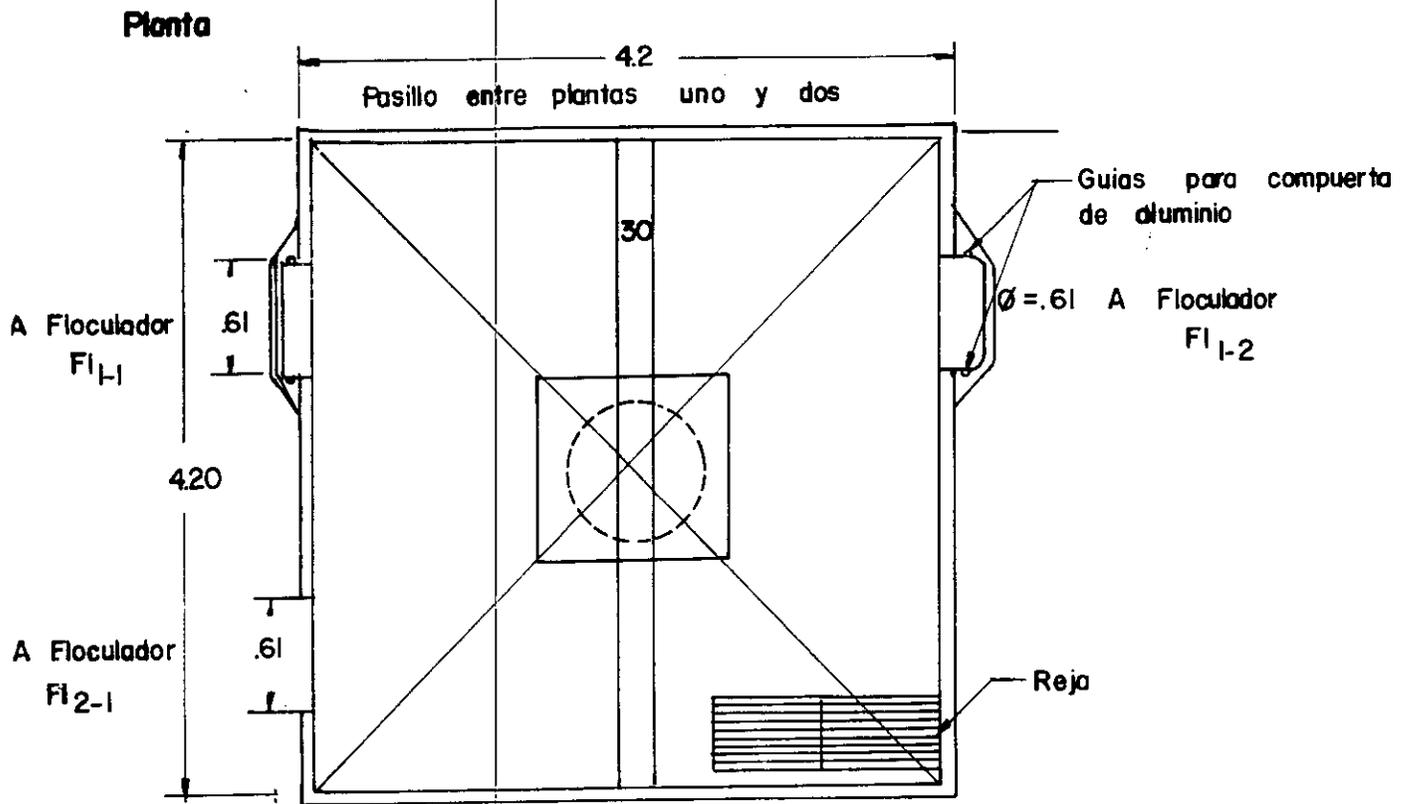
**4.1.2 Mezcla rápida.** La unidad de mezcla rápida, que es conjunta para las plantas uno y dos, está constituida por un tanque de dimensiones 4,2 m x 4,2 m x 4,65 m de altura. La profundidad normal del agua es de 3,4 m a 3,5 m. Esta fué inicialmente una unidad con agitación mecánica proporcionada con una hélice tipo marino de cuatro paletas en hierro fundido. Este sistema fué abandonado por los altos costos de operación y mantenimiento.

Actualmente la agitación necesaria para la mezcla rápida es proporcionada por la expansión súbita en la sección, que se presenta al entrar el fluido en tubería de 0,61 m por el fondo del tanque de la cámara de sección cuadrada de 4,2 m de lado. (Figura 3 ).

La unidad de mezcla rápida tiene tres salidas en tubería de 0,61 m de diámetro. Una de ellas alimenta al floculador de la planta número dos y las otras van cada una a un floculador en la planta uno. Estas salidas pueden ser cerradas mediante dos compuertas metálicas y la tercera salida mediante una válvula de mariposa a la entrada del floculador No. 2 de la planta uno (F2-1).

**FIGURA 3. UNIDAD DE MEZCLA RAPIDA  
PLANTAS 1 y 2**

73



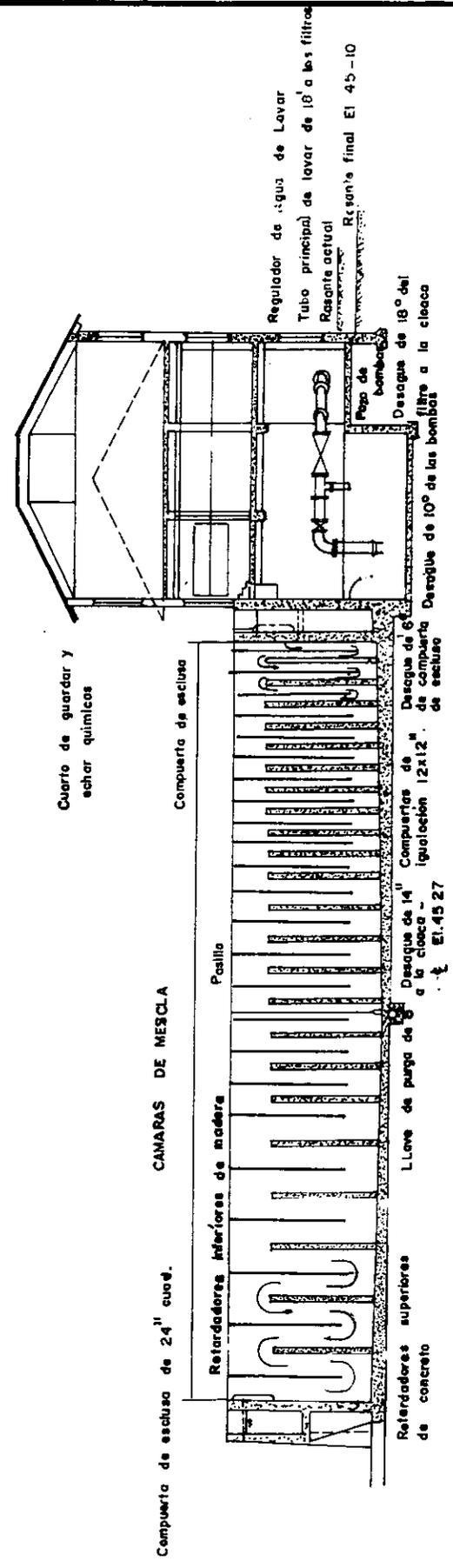
**4.1.3 Floculación.** La planta uno inicialmente contó con un floculador hidráulico de flujo vertical. Posteriormente, al construirse la planta dos, se le adicionó un floculador mecánico el cual rápidamente quedó fuera de servicio. Este último sigue trabajando como si fuese del tipo hidráulico hasta la fecha, resultando en una marcada diferencia entre la eficiencia de los dos floculadores. Al primero se le denominó Fl<sub>1-1</sub>, y Fl<sub>2-1</sub> al segundo. (Figura 4).

**4.1.3.1 Floculador hidráulico (Fl<sub>1-1</sub>).** Se compone de dos cámaras de mezcla paralelas de 30,32 m de longitud, 1,6 m de ancho y profundidad variable entre 5,79 m en los extremos y 6,09 m en el centro. Cada cámara tiene en el centro una válvula de purga de 0,2 m de diámetro que vierte sobre el tubo de desagüe de 0,36 m (14 pulgadas) de diámetro. Este tubo de desagüe es común a floculadores y sedimentadores.

En condiciones normales de operación la profundidad del agua dentro del floculador es de 4,7 m resultando así los volúmenes total y el útil en 575 m<sup>3</sup> y 470 m<sup>3</sup> respectivamente.

Presenta tres zonas de diferentes gradientes de velocidad así:

FIGURA 4. FLOCULADOR DE LA PLANTA I



- En los primeros 8,7 m presenta 22 tabiques de 0,25 m de ancho formados por 11 retardadores superiores de concreto y 11 retardadores inferiores de madera. Los retardadores de concreto son muros de 4,2 m de altura por 30 cm de ancho, con compuertas de igualación de 0,3 m x 0,3 m en la parte central inferior y los de madera se forman por tablonces de cinco cm de espesor.

- La segunda zona tiene 10 m de longitud y consiste en 14 tabiques de 0,51 m de ancho formados por retardadores iguales a los ya descritos.

- La tercera zona, últimos 11,6 m, presenta 10 tabiques de 0,91 m de ancho.

La zona de entrada a este floculador consiste en un canal de 0,91 m x 1,83 m y 1,8 m de profundidad. A este canal vierte el tubo proveniente de la mezcla rápida y el agua pasa a las dos cámaras del floculador a través de compuertas de esclusa de 0,61 m de lado.

La salida del floculador se hace también por compuertas de esclusa de 0,61 m que vierten a un canal de interconexión con los sedimentadores de dimensiones 0,91 de ancho, 3,05 m de profundidad y 37 m de largo. Este canal está comunicado con el canal similar de la planta No. 2 por un tubo de 1,07 m de diámetro y 8,9 m de longitud.

**4.1.3.2 Floculador Fl2-1.** Este floculador es un tanque de 5,6 m de altura, 29,5 m de largo y 3,7 m de ancho que inicialmente funcionó como floculador mecánico de eje horizontal. Presenta 4 zonas o compartimentos: la zona de entrada y tres cámaras con agitadores de aspas de diferentes áreas para que proporcionaran gradientes de velocidad decrecientes.

La zona de salida es por dos vertederos de pared gruesa que descargan al canal de interconexión con los sedimentadores. Los volúmenes total y normal del floculador son de 611 y 480 m<sup>3</sup> respectivamente.

Es en realidad un tanque sedimentador de agua no floculada. El flujo ascendente y descendente que se da entre sus 4 compartimentos no presenta la agitación necesaria para producir un floc de calidad. Al eliminarse la agitación mecánica no se le hizo ninguna clase de acondicionamiento para que siguiera funcionando como floculador.

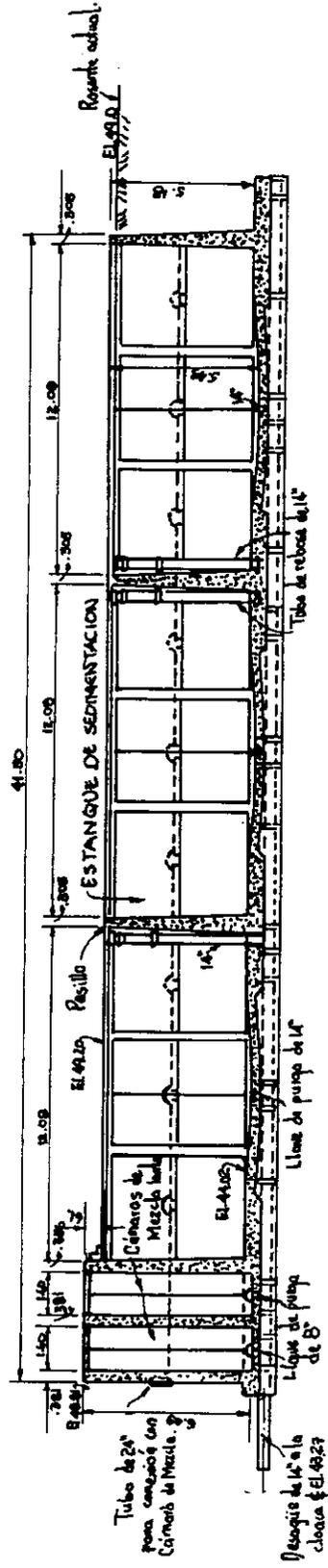
**4.1.4 Sedimentadores.** La planta uno tiene tres unidades de sedimentación convencionales de flujo horizontal cada una de las siguientes dimensiones: 12,09 m de ancho, 32,92 m de largo, 5,18 m de profundidad y pendiente en el fondo del 2% hacia el centro. Allí se encuentra la válvula

de purga, de 0,36 m de diámetro, de accionamiento manual desde el pasillo o puente superior del sedimentador. Así el volumen útil hasta el rebose es de 1.920 m<sup>3</sup> y hasta el nivel normal de operación es de 1.770 m<sup>3</sup>. El rebose se hace por un tubo de 0,36 m que descarga sobre el desagüe de lodos. (Figura 5).

En la zona de entrada, la descarga del agua floculada se hace por el fondo del canal distribuidor, controlada por tres válvulas de disco de 0,41 m de diámetro. No presentan pantalla difusora si no un muro inferior de 1 m de altura. Así la zona de entrada es una abertura vertical de 1,75 m de alto por 12 m de ancho.

La salida del agua decantada se hace en cada sedimentador por tres compuertas de esclusa de 0,41 m de diámetro. Estas descargan a un canal de 91 cm de ancho, 1,33 m de profundidad y 36,9 m de longitud, el cual hace el reparto a cada uno de los seis filtros de la planta uno.

FIGURA 5. SEDIMENTADORES DE LA PLANTA I.



4.1.5 Filtración. La planta uno cuenta con seis filtros rápidos de dos caras cada uno. Las dimensiones de la caja del filtro son 6,7 m x 5,9 m x 3 m de profundidad y el área filtrante mide 6,1 m x 2,44 m por cara. (Figura 6).

El lecho filtrante se compone de una capa de 30 cm de grava, 30 cm de arena y 40 cm de antracita. El sistema de recolección del agua filtrada e inyección de agua de lavado es mediante tubos perforados de PVC de 7,6 cm de diámetro colocados transversalmente cada 23 cm centro a centro. (Figura 7).

Estos tubos llegan a un tubo múltiple rectangular de dimensiones 0,38 m x 0,30 m. Este conducto cambia su sección a una circular de 0,41 m de diámetro al salir del filtro. Dicho tubo termina en un accesorio en te ( T ) de diámetros 0,41 m x 0,41 m x 0,25 m a la que se conectan las tuberías de agua de lavado, desagüe del lavado inicial y agua filtrada. Sobre la derivación de 0,25 m está la válvula del efluente y luego un regulador de caudal del tipo simplex, hoy en día fuera de servicio.

En la galería de filtros se encuentra por cada filtro las siguientes válvulas de control hidroneumático.

Válvula de  $\varnothing = 0,25$  m sobre el efluente

Válvula de  $\varnothing = 0,45$  m sobre el desagüe de agua de lavado

Válvula de  $\varnothing = 0,40$  m sobre afluente de agua de lavado

Válvula de  $\varnothing = 0,40$  m sobre efluente del filtrado inicial.

El agua afluente al filtro es controlada mediante una válvula de 0,41 m. Todas las válvulas son accionadas por agua a presión y los controles respectivos se encuentran en la mesa de operación de cada filtro. En la misma se encuentran los indicadores de pérdida de carga y caudal filtrado, hoy fuera de servicio.

Estos filtros fueron construidos con los equipos para hacerles lavado superficial del lecho. Estos equipos todavía se encuentran en su sitio aunque incompletos y han estado fuera de servicio por años.

El agua de lavado se recoge mediante tres canalones en hierro fundido por cada cara del filtro, que descargan en un canal central y por este a la tubería de desagüe.

El agua utilizada en el lavado de los filtros va a la dársena de recirculación. De allí es bombeada hacia el tanque de compensación No. 1 para ser nuevamente tratada. El volumen recirculado mensualmente es de unos 150.000 m<sup>3</sup>.

FIGURA 6. FILTROS DE LA PLANTA I.

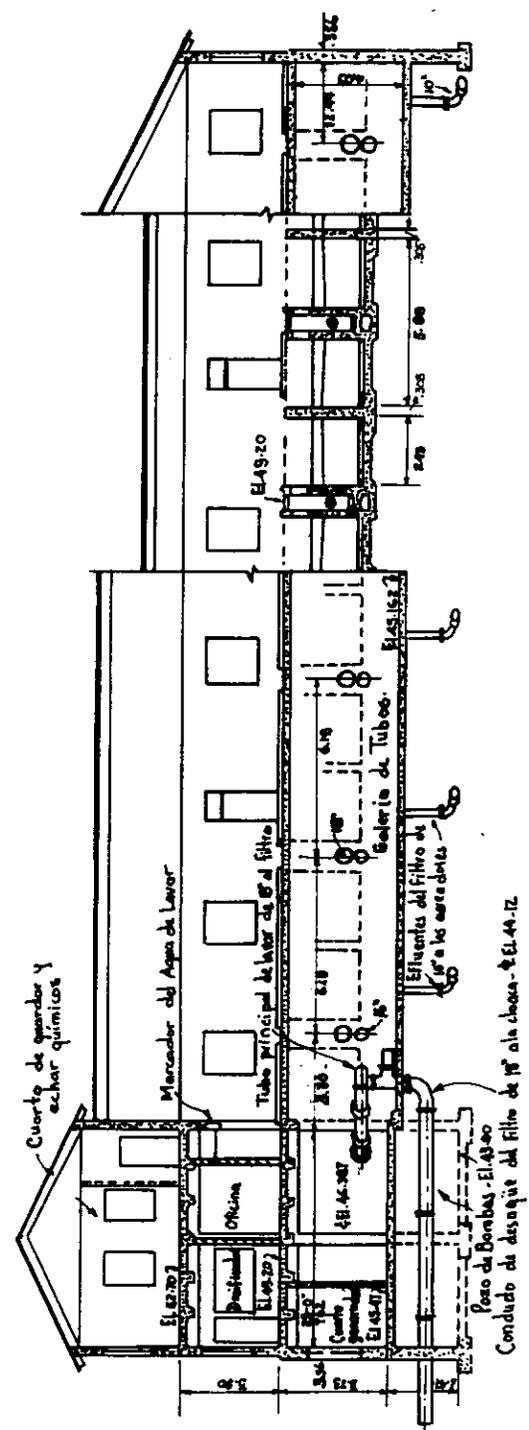
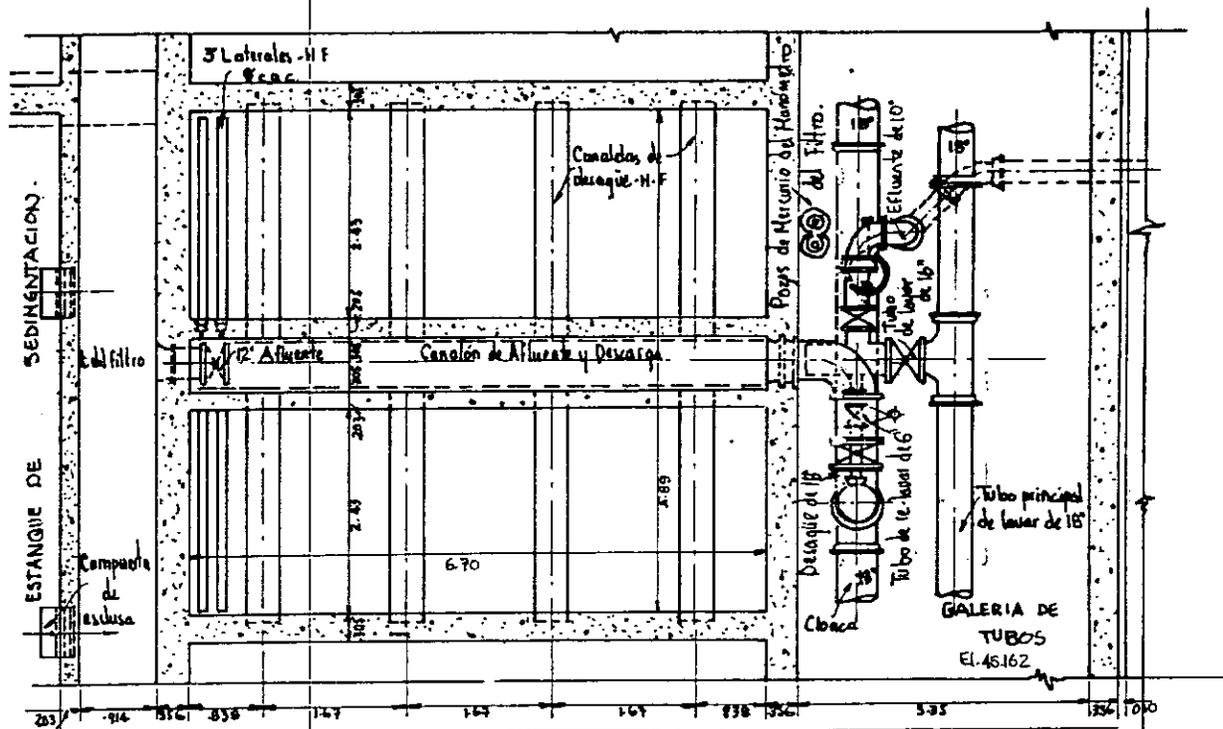
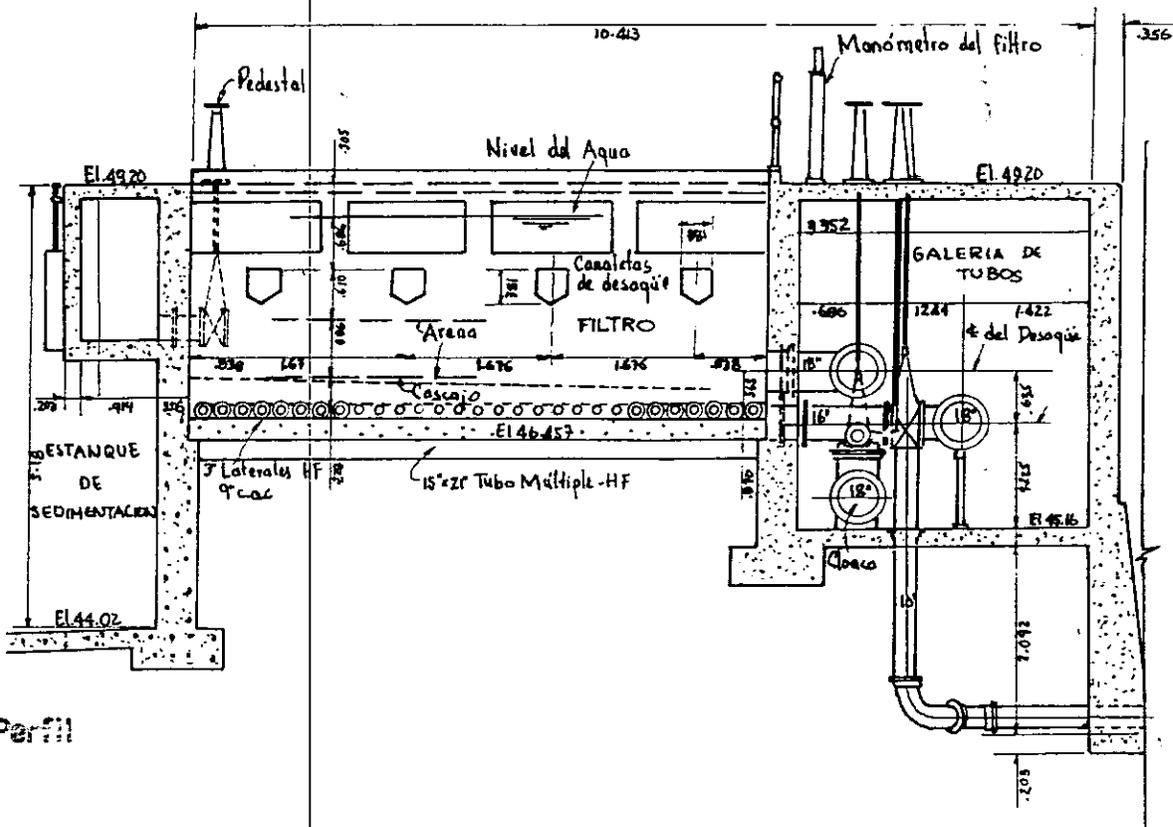


FIGURA 7. FILTRO TIPO PLANTA I



Planta



Perfil

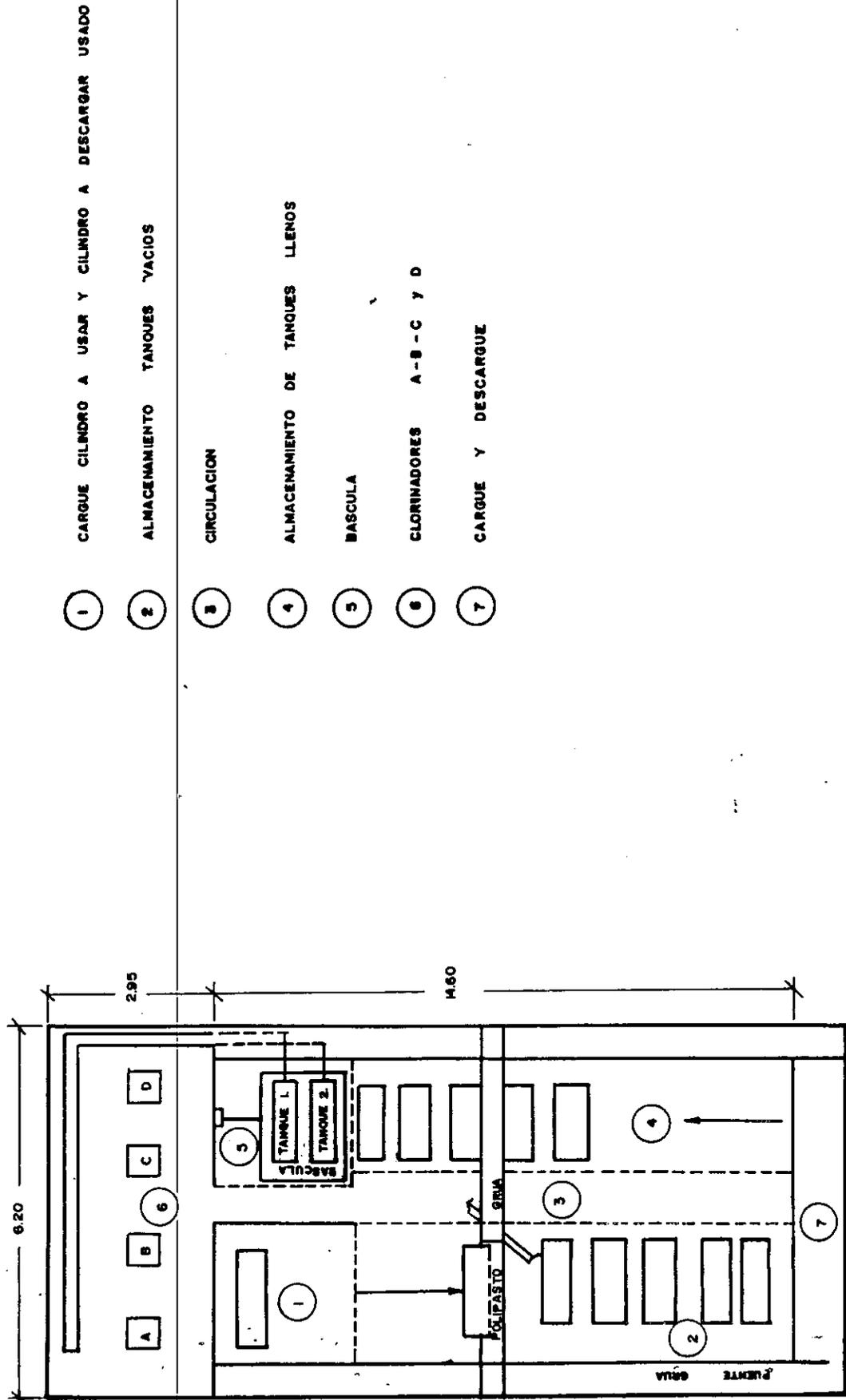
4.1.6 Desinfección. La desinfección se hace inyectando cloro gaseoso en solución acuosa que es dosificada según las características de tratabilidad del agua. Inicialmente el cloro se aplicaba mediante un difusor en la tubería que lleva el agua al tanque de almacenamiento. A fin de obtener unos mayores tiempos de contacto del agua con el cloro, se construyó la galería de desinfección con que cuenta hoy la planta uno. Esta galería, localizada sobre lo que fue antes la zona de aereadores, aloja el área de almacenamiento de cilindros de cloro, el cuarto de dosificadores, el de bombas auxiliares para dosificación y la cámara de desinfección. (Figura 8).

El local para el almacenamiento de tanques de cloro, es una zona cubierta, pero sin puertas. Esta dotado con un malacate montado sobre un puente grúa, que facilita las maniobras de cargue y descargue de los cilindros. Aloja también la báscula para el pesaje de los mismos.

El cuarto de cloradores es un recinto de 3,0 m x 6,2 m que aloja los cuatro dosificadores de cloro que actualmente funcionan para las tres plantas de tratamiento. Las características de los mismos son:

- Dosificador de cloro, marca Fisher & Porter, modelo 70 C3410A, con rotámetros de 400 libras/día de capacidad. Tiene 10 años de trabajo.

FIGURA 8. GALERIA DE DESINFECCION.



- ① CARGUE CILINDRO A USAR Y CILINDRO A DESCARGAR USADO
- ② ALMACENAMIENTO TANQUES VACIOS
- ③ CIRCULACION
- ④ ALMACENAMIENTO DE TANQUES LLENOS
- ⑤ BASCULA
- ⑥ CLORINADORES A-B-C Y D
- ⑦ CARGUE Y DESCARGUE

- Dosificador marca Advance Gas Chlorinator, con capacidad del rotámetro de hasta 500 libras/día. Tiene 15 años trabajando.

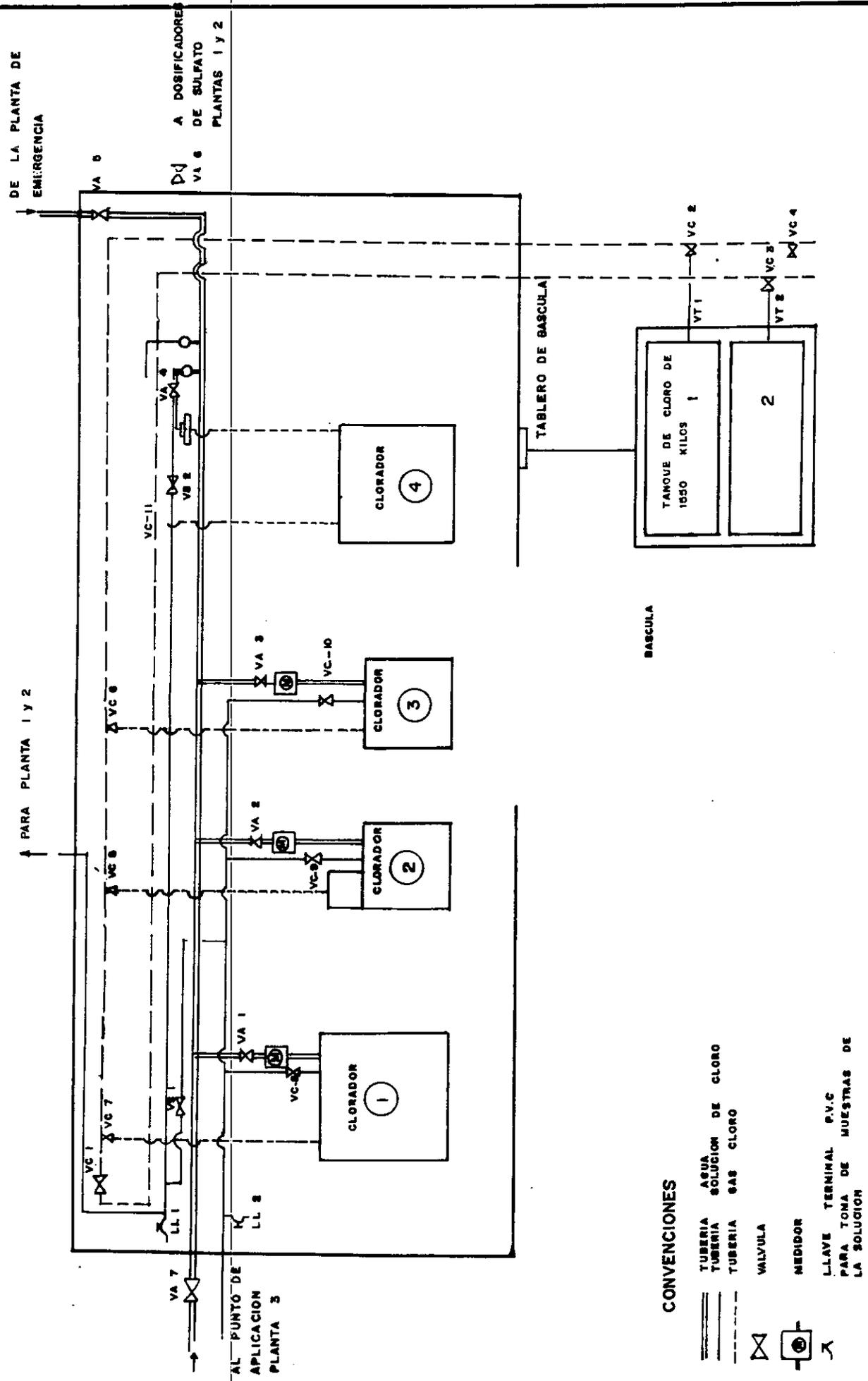
- Dosificador Pennwait Wallace & Tiernan, modelo C -802-V AK 16437 con capacidad del rotámetro entre 100 y 2000 libras/día. Dosifica el cloro requerido para el tanque de desinfección de la planta tres.

- Dosificador Pennwait Wallace & Tiernan, modelo C -802-V AK 16437 con capacidad del rotámetro entre 100 y 2000 libras/día. Este equipo fue recientemente instalado y permanecerá inicialmente como reserva. Al hacer su instalación se cambio toda la tubería a los demás cloradores.

Los cuatro estan instalados de forma tal que puedan dosificar por dos tuberías distintas en diferentes alternativas de operación. Normalmente la dosificación en las plantas uno y dos es controlada por los dos primeros cloradores y el tercero dosifica para la planta tres. (Figura 9).

Estos equipos requieren para su funcionamiento agua a una presión mínima de 180 psi. que es suministrada por el equipo hidroneumático conjunto para las plantas uno y dos o por bombas auxiliares en situaciones de emergencia.

FIGURA 9. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE CLORADORES



El cuarto de bombas auxiliares para agua de dosificadores es un local de 18 m<sup>2</sup>, en donde están instaladas dos bombas de las siguientes características:

- Bomba con motor eléctrico Siemens, trifásico de 9,6 H.P. y 3.520 rpm, modelo 1LA3 - 130-2YB70.
- Bomba con motor a gasolina marca Briggs and Stratton, de 16 H.P. y 3.600 rpm.

Se utilizan cuando hay daños en el sistema hidroneumático, para dar la presión necesaria al agua que alimenta a los dosificadores de sulfato de aluminio y de cloro.

La cámara de desinfección es un tanque rectangular de 6,2 m de ancho, 12 m de largo y altura media de 2,0 m. A ella llega el agua filtrada por tres tubos de hierro fundido de 0,25 m de diámetro proveniente de la planta uno y por un tubo de  $\varnothing = 0,61$  m la proveniente de la planta dos. La solución de cloro dosificada llega por dos tubos de 7,5 cm de diámetro en P.V.C..

La salida del agua hacia el tanque de almacenamiento se hace por un tubo de concreto de 1,07 m de diámetro.

La tubería del drenaje es de 0,76 m en tubería de asbesto-cemento Eternit. Estas tuberías tienen más de 40 años de servicio.

4.1.7 Otros equipos y estructuras. Además de lo descrito anteriormente para cada uno de los procesos de tratamiento, la planta uno tiene las siguientes estructuras:

- Cuarto de almacenamiento de sulfato de aluminio y de llenado de tolvas. Es el tercer piso del edificio de la planta uno, tiene por dimensiones 10,4 m x 6 m y 3 m de altura útil. Aloja la tolva del dosificador de sulfato de aluminio de las plantas uno y dos y permite almacenar aproximadamente 28 toneladas de este producto, equivalentes al consumo en estas dos plantas durante siete días.

El sulfato es llevado al tercer piso mediante un elevador montacargas con capacidad para tres toneladas, motor marca Demus Seilzug N°4295, 230/440 V, 11/6 A, cos  $\phi$  =0,8 y 1.690 rpm.

- Panel de control de caudales. Este equipo con tableros electrónicos está situado en el piso de operaciones (segundo piso) frente al filtro No. 3. Instalado en 1983, debería registrar los caudales que pasan por las tuberías que salen de la planta de tratamiento hacia la ciudad pero salió de servicio a los pocos días de funcionamiento y no ha sido reparado.

- Foso de bombas de agua de lavado. Es un semisótano en forma de L situado a nivel de la cota 42,47 m es decir 3 m por debajo del nivel piso de la galería de filtros. En este foso se encuentran las dos bombas utilizadas para llenar el tanque de agua de lavado de filtros de las plantas uno y dos. Las características de las mismas son:

Bomba centrífuga Wortin

Motor eléctrico trifásico marca Asea tipo N160 L-4

Potencia = 30 H.P.

Voltaje : 220-260/440 V

Corriente: 39 y 75 Amp

w = 1.760 rpm.

El diámetro de impulsión al igual que el de la succión es de 0,20 m . Esta última se hace en el tubo de 1,07 m de diámetro que sale de la cámara de desinfección hacia el tanque de almacenamiento. También se encuentra en este nivel el tanque del equipo hidroneumático que tuvo inicialmente la planta uno, hoy fuera de servicio.

- Generador de emergencia. En el primer piso del edificio principal de la planta uno se encuentran el generador de emergencia y la bomba y motor del hidroneumático de la misma planta que se dijo esta fuera de servicio.

Las características de estos equipos son:

- Generador marca Stanford, tipo HK 11C, V = 127/220, I = 49,2 Amp, P = 18,75 KVA, w = 1.800 rpm, Trifásico.

- Bomba centrífuga marca Goulds Pyramid  
Motor Diesel, marca Lister, tipo 1382 - HR 2.440, P = 38  
HP, W = 2.000 rpm.

- Servicios instalados. El edificio de la planta uno tiene instalados como servicios complementarios una extensión de la línea telefónica, un citófono para comunicación con la planta tres o con la portería y un equipo de radio para comunicación con las estaciones de bombeo y demás dependencias de las Empresas Públicas.

#### 4.2 DESCRIPCION DE LA PLANTA NUMERO DOS

Construida en 1959, esta segunda planta de tratamiento es de las mismas características de la planta uno. El diseño es de la firma norteamericana Rader and Associates - Ingenieros y Arquitectos radicada en Miami, Florida.

Las referencias técnicas existentes en los archivos de las E.E.P.P.M.M. consisten en el juego de planos de diseño (40 planchas en total). Esta planta, también del tipo convencional, cuenta con los siguientes procesos unitarios: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

**4.2.1 Coagulación.** La mezcla rápida se realiza en la cámara de agitación común a las plantas uno y dos. Esta es un tanque de concreto de sección cuadrada de 4,2 m de lado y 4,65 m de altura.

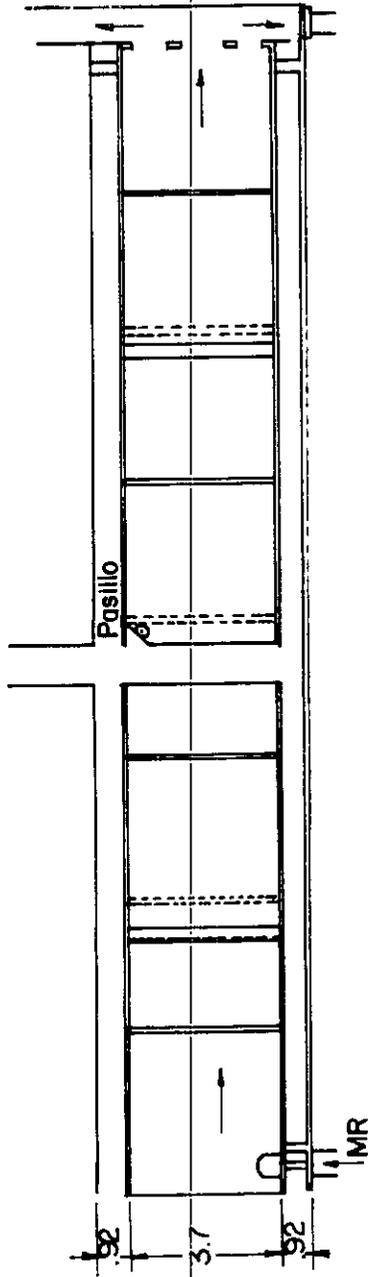
La mezcla se produce por la disipación de energía generada al ensancharse bruscamente el diámetro del conducto del agua. De esta cámara pasa el agua al floculador de la planta No. 2 por un tubo de 0,61 m de diámetro y aproximadamente 2 m de longitud que termina en un codo sumergido.

**4.2.2 Floculación.** Este proceso se verifica en un tanque rectangular de dimensiones  $A = 3,6$  m,  $L = 29,8$  m y  $H = 4,5$  m, que inicialmente fué una unidad de floculación del tipo mecánico. Presentaba tres zonas de distintos gradiente de agitación, proporcionada por paletas girando sobre un eje horizontal.

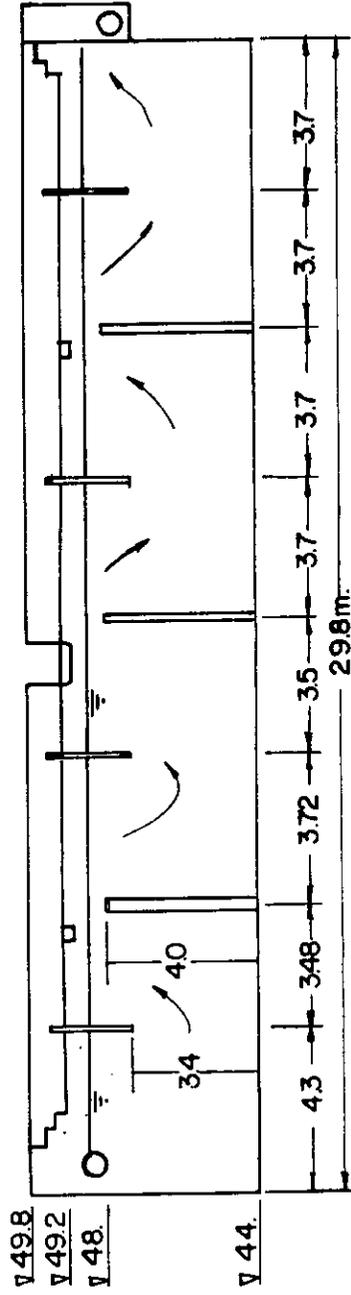
Al quedar fuera de servicio los motores del sistema, se habilitó como floculador hidráulico de tabiques verticales. Para lograr esto las tres paredes divisorias de concreto quedaron funcionando como retardadores superiores y se adicionaron cuatro retardadores inferiores de madera (Figura 10).

FIGURA 10. FLOCULADOR FI<sub>1-2</sub> . PLANTA 2

Planta



Corte



Esc : 1 : 200

FIGURA 10

Floculador de la planta dos

La evacuación de lodos se hace mediante una válvula de fondo de 0,10 m de diámetro que descarga sobre el tubo de desagüe de la planta de 0,35 m de diámetro.

**4.2.3 Sedimentación.** Esta planta de tratamiento tiene tres tanques sedimentadores de dimensiones  $L = 32,9$  m ,  $A = 12,1$  m y  $H = 5,18$  m a los cuales se reparte el agua mediante un canal distribuidor de 1,0 m de ancho, altura de 3,7 m y 36,9 m de longitud.

El agua entra al sedimentador por tres válvulas de disco de 0,41 m de diámetro en el fondo del canal. Luego es distribuida mediante una pantalla difusora de 144 orificios de 20 cm x 20 cm, organizados en 6 grupos y por 6 aberturas a nivel del piso del tanque de 20 cm por 1 m.

La salida del agua sedimentada se hace por rebose mediante tres canales de 60 cm de ancho y 76 cm de altura que reciben a su vez dos canales transversales. Estos canales presentan en sus paredes laterales orificios circulares de 5 cm de diámetro. Son en total 186 orificios. Por estos canales pasa el agua a un canal de distribución similar al descrito para la planta 1 y por el a los filtros.

La estructura de salida descrita existe solo en dos de los tres sedimentadores de esta planta y corresponden a modificaciones hechas posteriormente a su construcción.

El otro sedimentador tiene por salidas tres compuertas rectangulares de 0,61 m de lado. ( Figura 11).

En el canal de distribución del agua sedimentada se hace la toma para el sistema hidroneumático de las plantas uno y dos. A este canal se tiene acceso por tres aberturas con tapa metálica removible de 90 cm x 90 cms..

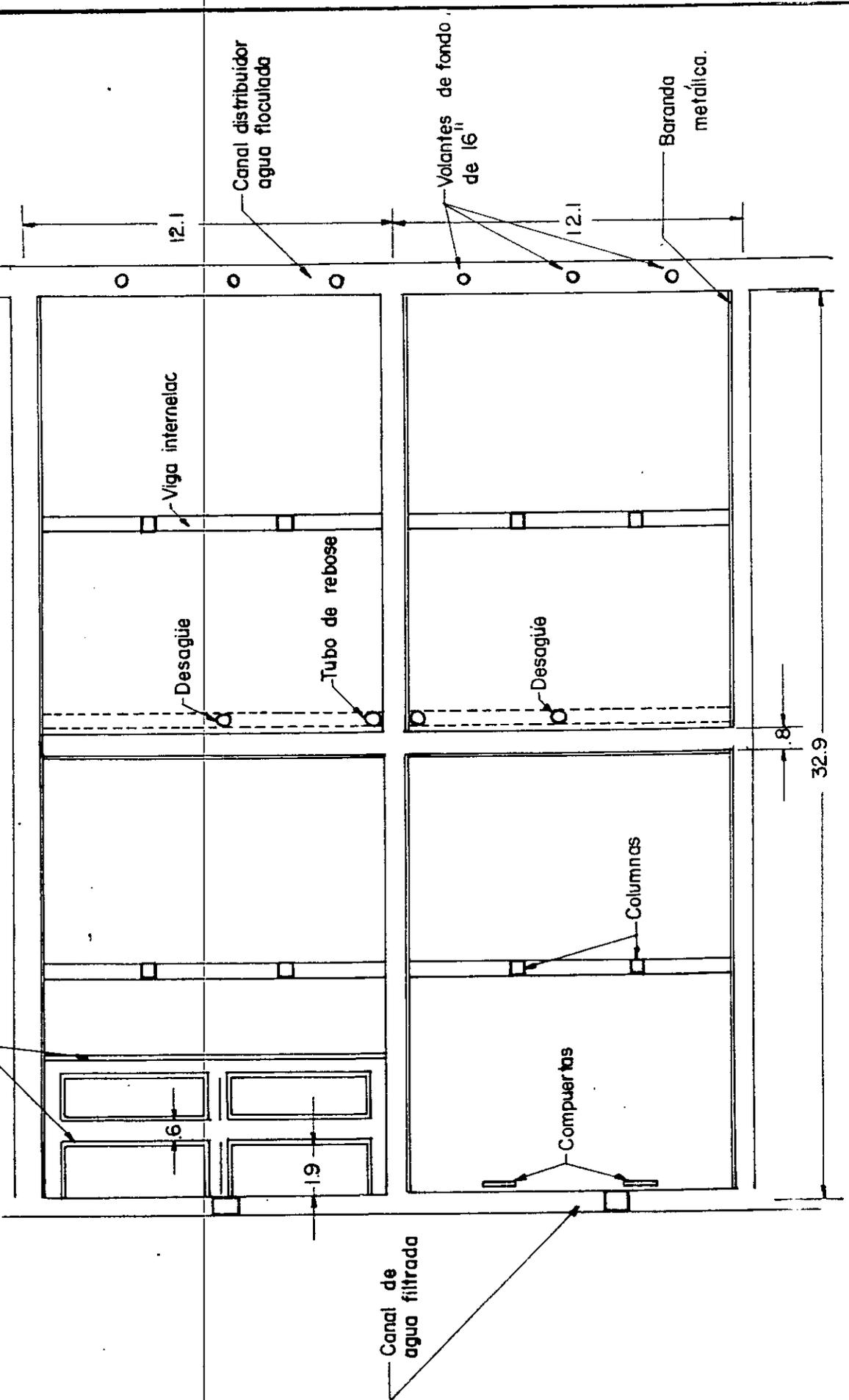
Los pasillos principales de los sedimentadores cuentan con barandas metálicas en uno de sus lados. Además a diferencia de los sedimentadores de la planta uno, presentan vigas intermedias en los puntos cuarto y tres cuartos de la longitud del tanque.

El tubo de rebose de cada tanque sedimentador y el desagüe de fondo son de 0,35 m de diámetro. El tubo de desagüe es común a los tres sedimentadores y al floculador, y se une al similar proveniente de la planta uno, para luego seguir en tubería de 0,76 m de diámetro hacia el drenaje.

**4.2.4 Filtración.** La planta número dos consta de tres filtros rápidos de flujo descendiente y lavado ascensional, de dos caras cada uno. La caja del filtro tiene por dimensiones 6,70 m de largo x 11,60 m de ancho x 2,80 m de profundidad; el canal intermedio tiene 80 cm de ancho; el filtro esta enchapado en la parte superior.

FIGURA 11. SEDIMENTADOR PLANTA 2

Canales con orificios de  $\varnothing = 2''$  en sus paredes 0.30 m



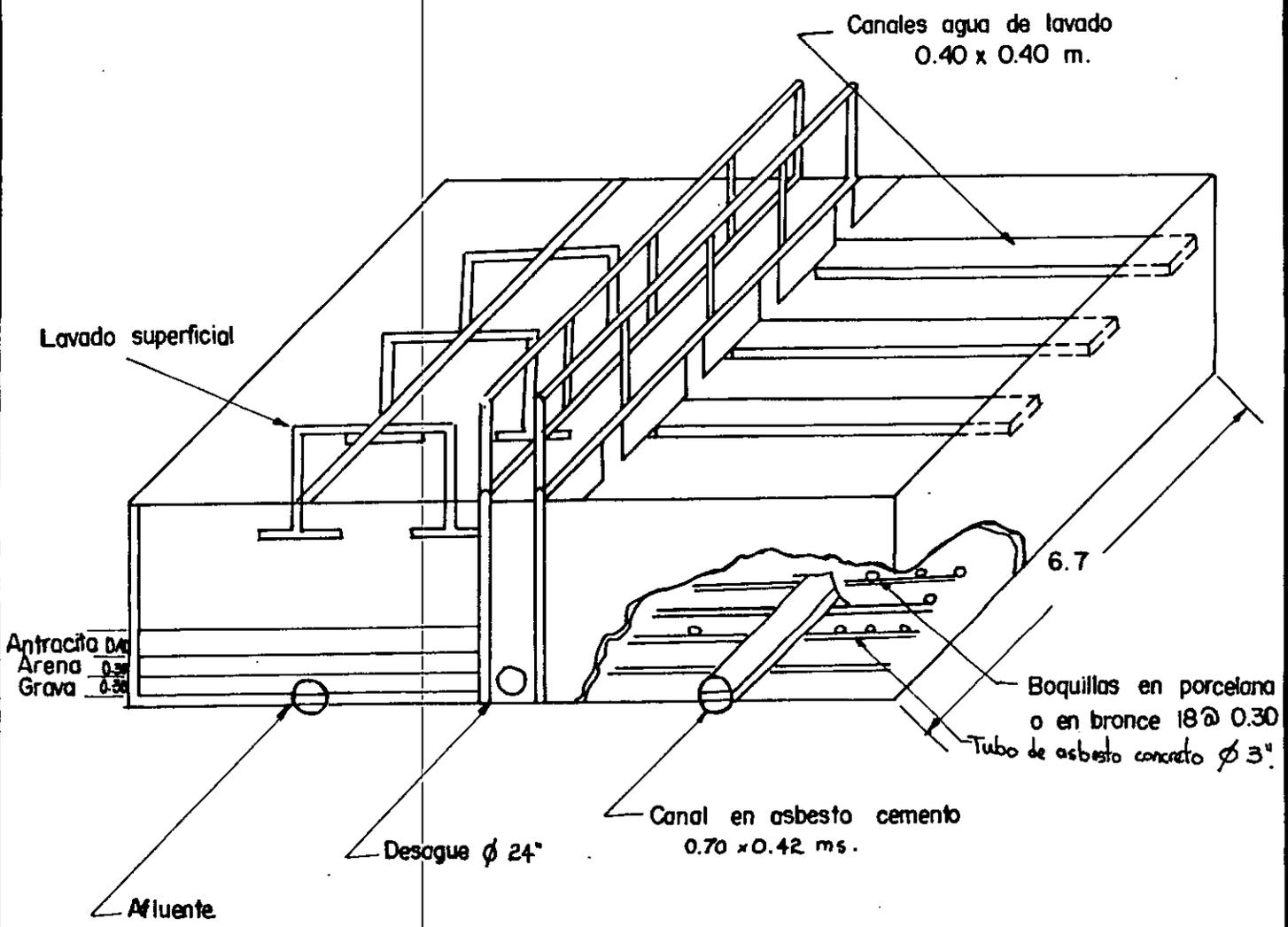
El lecho filtrante se compone nominalmente de tres capas, de espesores, 30 cm de grava, 30 cm de arena para filtros y 40 cm de antracita. El sistema de recolección del agua filtrada y de distribución del agua de lavado en cada cara del filtro se hace mediante 378 boquillas o coladeras. Estas boquillas son en porcelana para los filtros 1 y 3 (F<sub>1-2</sub> y F<sub>3-2</sub>) y en bronce para el filtro F<sub>2-2</sub> que fué sometido a reparación recientemente. (Figura 12).

Las boquillas se distribuyen formando una cuadrícula de 20 espacios cada 0,32 m por 17 espacios cada 0,3 m. El agua recolectada por las boquillas pasa a tubos de asbesto cemento de 7,5 cm de diámetro que a su vez vierten en un canal central por cara filtrante de 70 cm de lado, longitud de 6,7 m y piso inclinado con altura inicial de 28 cm y de 42 cm en el extremo final.

Este último extremo descarga en un tubo de hierro fundido de 0,51 m de diámetro que atraviesa el muro y se conecta a la tubería afluyente del agua filtrada.

El agua de lavado es recogida por cuatro canaletas de hierro fundido de 40 cm de ancho por 40 cm de alto que vierten al canal central y este a la tubería de desagüe. La altura entre la parte superior del lecho filtrante y el borde superior de las canaletas es de 1,70 m.

FIGURA 12. ISOMETRICA DEL FILTRO. PLANTA 2



Se encuentra instalado un sistema de lavado superficial del lecho en tubería de hierro de 7,5 cm y 6,3 cm de diámetro y tubos aspersores de 1,35 m de longitud que al girar distribuyen el agua sobre la superficie del lecho. Existen cuatro aspersores por cara de filtro pero no se han usado por problemas de operación.

El tablero de mandos o mesa de operación de cada filtro cuenta con ocho manijas para operar igual número de válvulas. Estas válvulas se operan hidráulicamente desde la mesa o desde un panel de palancas por filtro existente en la galería de filtros.

En la galería de filtros de la planta dos se encuentran tres tubos principales: Un tubo de  $\varnothing = 0,61$  m, de color verde que lo distingue como tubería colectora del agua filtrada; un tubo de  $\varnothing = 0,61$  m de color negro que es la tubería colectora del agua de lavado de los filtros y un tubo de  $\varnothing = 0,51$  m de color azul que conduce el agua para lavado de filtros.

Además existen diez válvulas por cada filtro así:

- Válvula de compuerta de  $\varnothing = 0,3$  m, para el agua de lavado
- Dos válvulas de  $\varnothing = 0,51$  m para controlar la entrada del agua de lavado (una por cara filtrante)
- Dos válvulas de  $\varnothing = 0,25$  m para el efluente del filtro

- Dos válvulas de  $\varnothing = 0,20$  m para el relavado o desagüe de la primera agua filtrada
- Dos válvulas de  $\varnothing = 0,15$  m para el sistema de lavado superficial.

Además cada filtro tiene un controlador de flujo del agua filtrada del tipo simplex, pero no están en uso.

En la galería, para cada filtro existe un panel de controles de las válvulas, con ocho palancas y que en orden de izquierda a derecha accionan las siguientes válvulas:

- 1) Lavado superficial de la cara izquierda.
- 2) Lavado ascensional de la cara izquierda.
- 3) Afluente.
- 4) Efluente.
- 5) Desagüe principal.
- 6) Lavado superficial de la cara derecha.
- 7) Lavado ascensional de la cara derecha.
- 8) Desagüe de primera agua filtrada.

Cuando la válvula respectiva está abierta, la palanca está en posición abajo; al accionar la manija de control en el sentido contrario en la mesa de operación la palanca llega a la posición horizontal. Luego debe bajar el operador a la galería de filtros, llevar la palanca hasta la posición

correspondiente según vaya a dejar la válvula abierta o cerrada, y colocar el pasador que la bloquea en esa posición. Así se evita que la válvula sea accionada accidentalmente desde la mesa de operación por personas ajenas a la operación.

**4.2.5 Desinfección.** El agua filtrada en la planta dos es llevada por conducto de 0,61 m de diámetro hasta la cámara de desinfección de la planta uno donde es sometida a cloración. Y luego es conducida al tanque de almacenamiento para su distribución, como se detalló al referirnos a la planta uno. La dosificación del cloro se hace mediante un clorador marca Wallace & Tierman localizado en la planta uno.

Las instalaciones de la planta dos están comunicadas con la planta uno mediante un pasillo sobre el tubo de interconexión de los canales de distribución de ambas plantas y mediante un pasillo cubierto cerca a la cámara de mezcla rápida.

**4.2.6 Otros equipos y estructuras.** La edificación de la planta dos que aloja a los filtros es de dos niveles y la cubierta o azotea. El primer nivel corresponde a la galería de filtros, dos bodegas de empaques vacíos de sulfato y un local de 6 m x 8 m donde se alojan los

tableros de control eléctrico de la planta dos y los motores y compresor del sistema hidroneumático.

En el segundo nivel está el pasillo de operaciones y la parte superior de los filtros. También existe un local habilitado como laboratorio pero que esta actualmente desocupado.

El tercer nivel o azotea comunica con el piso del cuarto de dosificadores de la planta uno.

El agua a presión requerida para accionar las válvulas, alimentar a los dosificadores de sustancias químicas, lavar estructuras y eventualmente hacer el lavado de pisos en las plantas uno y dos es suministrada por un equipo hidroneumático de marca K.S.B.

Este equipo, instalado en 1958, consta de:

- Un tanque de 40 m<sup>3</sup> y rango de presiones de 80 - 120 psi.
- Bomba centrifuga horizontal, marca Goulds Pyramid.
- Motor eléctrico trifásico General Electric tipo 5K 324 AG130; potencia, 30 H.P.; voltaje, 220/440 V; corriente 73,8 / 36,9 Amp; velocidad angular, 3.550 rpm.
- Compresor marca Ingersoll Rand, modelo 234 CH tipo 30 y presión máxima de 200 psi.
- Motor eléctrico trifásico marca Wayner, tipo RP1, 1 1/2 HP, 240/480 V, 4,6/2,3 Amp, 1.750 rpm.

### 5. ACTIVIDADES DE EVALUACION

Las actividades de evaluación que se describirán en detalle en este capítulo se llevarón a cabo en un lapso de tiempo de un año. Durante este período comprendido entre Abril de 1989 y el mismo mes de 1990 se enmarcan todas las tareas que hoy concluyen en el presente informe. Entre esas tareas se destacan las siguientes:

- Curso de capacitación en las técnicas a aplicar al evaluar la operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento.
- Actividades preliminares de la investigación en que se aplicarían las metodologías aprendidas, delimitación y aspectos de viabilidad de la misma.
- Programación de actividades, recopilación de información preliminar y consecución de recursos necesarios.
- Ejecución de las prácticas y monitoreos programados.

- Análisis de resultados, formulación de recomendaciones e informe final.

Sin embargo en términos rigurosos el proyecto fué desarrollado entre los meses de Diciembre de 1989 y Marzo de 1990, es decir tuvo una duración de 5 meses.

Estos estudios abarcaron el mayor número de aspectos posibles relacionados con el normal funcionamiento y mantenimiento de los equipos y estructuras que conforman las plantas de tratamiento No. 1 y No. 2 del acueducto de Cartagena.

Para cumplir con este cometido se desarrollaron las siguientes etapas:

1.- Inventario y caracterización de cada uno de los procesos a los que se somete el agua para su tratamiento. Determinación de parámetros para medir la eficiencia de cada proceso.

Análisis y conclusiones.

2.- Estudio de las secuencias de operación y rutinas de mantenimiento a cargo del personal de la planta. Determinación de su impacto sobre las eficiencias encontradas en cada proceso.

3.- Análisis de aspectos globales de administración, costos y control de calidad observados en las plantas evaluadas.

A continuación se describen los criterios de evaluación, las pruebas realizadas y sus resultados para cada uno de los aspectos considerados en este estudio.

El orden que se desarrollará será el mismo en que se dan los procesos unitarios de tratamiento del agua, a saber: Coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

Posteriormente se estudia la operación de la planta y el mantenimiento seguido. Finalmente nos ocuparemos de la administración de la planta, sus costos de operación y el control de calidad que se lleva a cabo.

### 5.1 COAGULACION

Se llama coagulación - floculación al proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con peso específico superior al del agua, lo que las hace fácilmente removibles en procesos posteriores.

La coagulación es el proceso por el cual se adicionan al

agua las sustancias coagulantes para reducir las fuerzas que tienden a mantener separadas a las partículas en suspensión.

Este proceso se utiliza para remover turbiedad orgánica e inorgánicas, color, bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación, algas y sustancias productoras de olor y sabor.

Los principales factores que influyen el proceso de coagulación y que serán tratados en este estudio son:

- Características de las aguas, especialmente pH, temperatura, alcalinidad, turbiedad y color.
- Características de las sustancias químicas, tipo, dosis, concentración de la solución.
- Características de las unidades en las plantas, intensidad de mezcla y tiempo de retención.

El proceso de coagulación y floculación presenta dos fases bien diferenciadas:

1. - La desestabilización de las partículas mediante la adición de sustancias químicas.
2. - El transporte y aglomeración de las partículas.

En lo concerniente a la primera fase, se tratarán los tópicos involucrados en la dosificación de sustancias químicas: Selección de sustancias químicas, almacenamiento y manejo de las mismas, el procedimiento de dosificación en sí.

**5.1.1 Selección de sustancias químicas.** En esta parte de la evaluación se quiere caracterizar las sustancias químicas y condiciones óptimas de aplicación, para lo que nos valemos de una serie de ensayos de laboratorio que a continuación se detallan.

El agua a tratar en la planta de tratamiento de Cartagena, como se mencionó al describir las obras de captación, proviene del río Magdalena a través de dos bocatomas: una sobre el Canal del Dique y la otra en un sistema lagunar conocido como Dolores.

Los coagulantes aplicables son el sulfato ferroso o el sulfato de aluminio, siendo este último el de uso más extendido y de fácil consecución en nuestro medio.

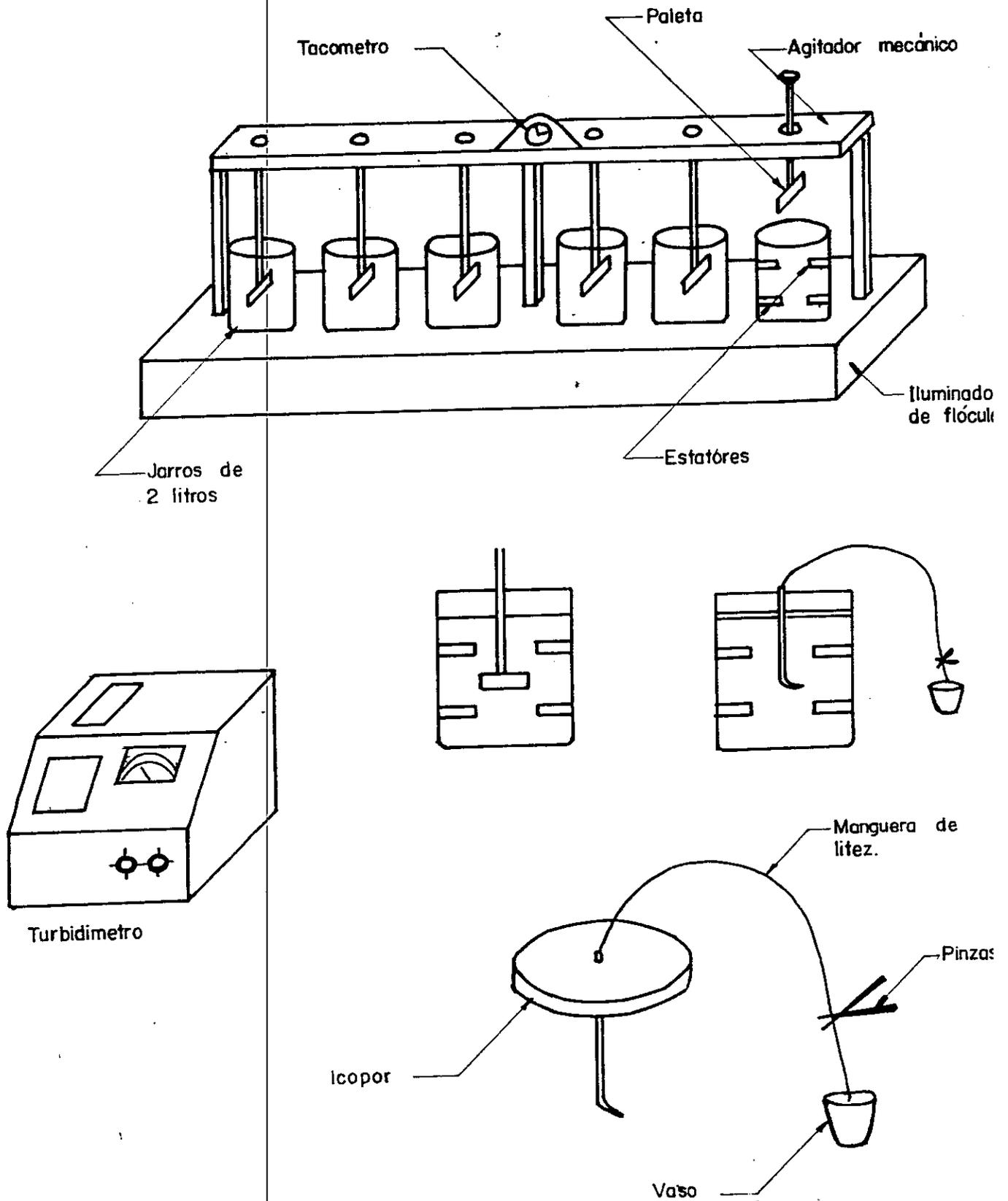
**5.1.1.1 Dosis óptima de coagulante. La prueba de jarras.** El producto químico utilizado como coagulante en la planta de tratamiento es el sulfato de aluminio,  $Al_2SO_3$  Tipo B. Para determinar la dosis óptima adecuada a la calidad del

agua cruda a tratar, recurrimos al ensayo de jarras. Este es el ensayo estandarizado por las autoridades sanitarias a nivel internacional. Es útil para encontrar parámetros de control aplicables a los diversos procesos de potabilización de aguas convencionales. En el pueden simularse las condiciones de coagulación, floculación, sedimentación e incluso es aplicable en la determinación de variables de filtración.

El equipo necesario para la prueba de jarras se muestra en la Figura 13 y consta de :

- Un agitador mecánico provisto con seis paletas capaz de operar a velocidades variables (de 0 a 100 rpm).
- Un iluminador de flóculos localizado en la base del agitador mecánico.
- Vasos de precipitado de 1000 ó 2000 ml, forma baja, de cristal refractario.
- Deflectores de latón.
- Tomadores de muestras.
- Equipo auxiliar : turbidímetro, comparadores de color, cristalería, cronómetro.

FIGURA 13. EQUIPO PARA EL ENSAYO DE JARRAS



La variable más importante en la prueba de jarras es la intensidad de agitación expresada como gradiente de velocidad. El movimiento se logra utilizando paletas o rotores accionados en forma mecánica o magnética. Cuando se utilizan sólo paletas debe recurrirse al uso de estatores o deflectores fijos que evitan la distorsión en los resultados.

Esta distorsión resulta del movimiento helicoidal que se origina al detener el motor del agitador. Las gradientes de velocidad han sido ya determinados por investigadores como Ruey, Hudson, Singley y Camp., para los diferentes tipos de rotores y deflectores.

El procedimiento del ensayo ejecutado para encontrar la dosis óptima es el siguiente:

- Se determinarán las características del agua cruda: turbiedad, color, pH, alcalinidad.
  
- Se colocó el agua de la muestra en las seis jarras y se introdujeron debajo de los agitadores.
  
- En jeringuillas de 10 ml se tuvo lista la cantidad de coagulante, solución de sulfato de aluminio, a aplicar a cada vaso.

- Se hicieron girar las paletas a 100 rpm y se aplicó rápidamente la dosis de coagulante a cada vaso. La agitación intensa se mantuvo durante 60 segundos.

- Luego se disminuyó la velocidad a 40 rpm durante 20 minutos para simular el proceso de floculación. Al final de este proceso se apagó el agitador y se sacaron las paletas. Se instalaron los sifones para la toma de muestras y se dejó sedimentar el agua por 10 minutos.

- Tomamos muestras de cada vaso y se les determinó a cada una la turbiedad, color, pH y alcalinidad remanente.

Con estos resultados seleccionamos como dosis óptima aquella que produce la menor turbiedad. Los resultados de las pruebas realizadas y sus correspondiente gráfica se muestran en las Tablas 2 a 17 y en la Figura 14.

**TABLA 2.** Datos iniciales para ensayo de jarras.

Fecha de ensayo : Dic 4/89	
T <sub>o</sub> = 21 U.N.T.	CONDICIONES DE ENSAYO
C <sub>o</sub> = 43 U.C.	
Alk = 71	
PH <sub>o</sub> = 6,9	
	M.R. = 60 s a 100 rpm
	M.L. = 20 min a 40 rpm
	SED = 10 min

TABLA 3. Resultados ensayo de jarras. Primera serie.

Vaso	1	2	3	4	5	6
Dosis (ppm)	46	48	50	52	54	56
(ml al 1%)	9,2	9,6	10,0	10,4	10,8	11,2
T <sub>r</sub> (U.N.T.)	6,3	8,2	8,5	8,2	7,0	8,7
C <sub>r</sub> (U.C.)	23,0	20,0	18,0	20,0	19,0	17,0
pH <sub>r</sub>	6,9	6,73	6,75	6,72	6,7	6,68
Alcalinidad	42,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0

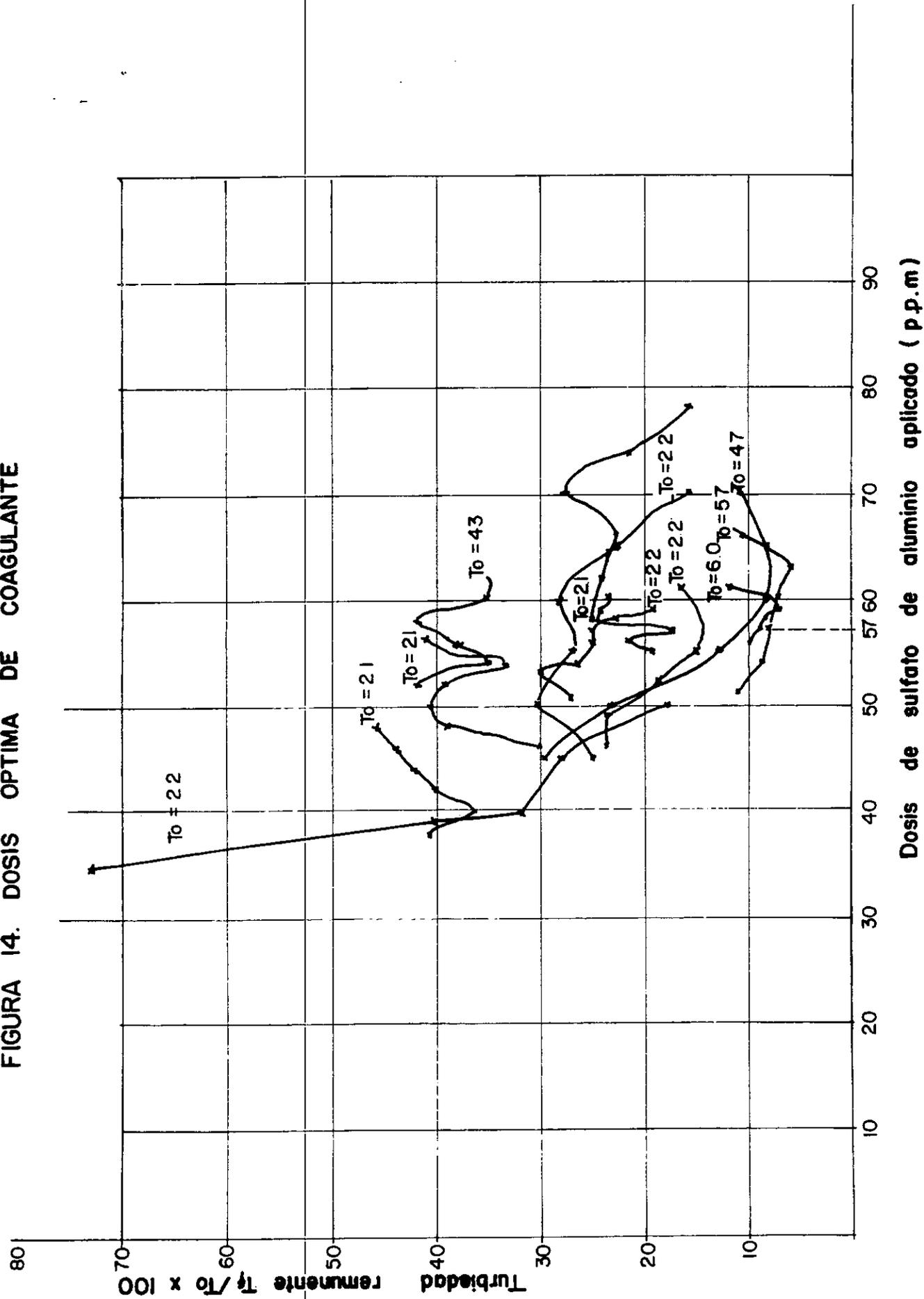
TABLA 4. Resultados ensayo de jarras. Segunda serie.

Vaso	1	2	3	4	5	6
Dosis (ppm)	38	40	42	44	46	48
(ml al 1%)	7,6	8,0	8,4	8,8	9,2	9,6
T <sub>r</sub> (U.N.T.)	8,5	7,6	8,0	7,5	8,2	6,4
C <sub>r</sub> (U.C.)	26,0	22,0	24,0	20,0	22,0	22,0
pH <sub>r</sub>	6,77	6,75	6,50	6,50	6,41	6,39

TABLA 5. Resultados ensayo de jarras. Tercera serie.

Vaso	1	2	3	4	5	6
Dosis (ppm)	55	56	57	58	59	60
(ml al 1%)	11,0	11,2	11,4	11,6	11,8	12,0
T <sub>r</sub> (U.N.T.)	4,1	4,6	3,6	5,2	5,1	5,0
C <sub>r</sub> (U.C.)	17,0	19,0	18,0	18,0	19,0	21,0
pH <sub>r</sub>	6,15	6,10	6,04	5,98	5,8	5,45

FIGURA 14. DOSIS OPTIMA DE COAGULANTE



**TABLA 6.** Datos iniciales para ensayo de jarras.

Fecha de ensayo : Dic 5 /89	
T <sub>o</sub> = 43 U.N.T.	CONDICIONES DE ENSAYO
C <sub>o</sub> = 35 U.C.	
Alk = 62	
PH <sub>o</sub> = 6,92	
	M.R. = 60 seg a 100 rpm
	M.L. = 20 min a 40 rpm
	SED = 10 min

**TABLA 7.** Resultados ensayo de jarras.

Dosis (ppm)	52	54	56	58	60	62
T <sub>r</sub> (U.N.T.)	18	15	16	18	15	15
C <sub>r</sub> (U.C.)	20	23	21	22	15	15
pH <sub>r</sub>	6,44	6,34	6,38	6,35	6,37	6,40

**TABLA 8.** Datos iniciales para ensayo de jarras.

Fecha de ensayo : Dic 7/89	
T <sub>o</sub> = 47 U.N.T.	CONDICIONES DE ENSAYO
C <sub>o</sub> = 33 U.C.	
Alk = 66	
PH <sub>o</sub> = 6,9	
	M.R. = 60 s a 100 rpm
	M.L. = 20 min a 40 rpm
	SED = 10 min

TABLA 9. Resultados ensayo de jarras.

Vaso	1	2	3	4	5	6
Dosis (ppm)	45	50	55	60	65	70
T <sub>r</sub> (U.N.T.)	14,0	11,0	6,0	3,9	4,0	5,2
C <sub>r</sub> (U.C.)	20	18	16	17	19	16
pH <sub>r</sub>	6,73	6,60	6,57	6,51	6,54	6,47

TABLA 10. Resultados ensayo de jarras. T<sub>o</sub> = 57 U.N.T.

Vaso no.	1	2	3	4	5	6
Dosis (ppm)	51	54	57	60	63	66
T <sub>r</sub> (U.N.T.)	6,4	5,0	4,8	4,2	3,4	6,0
C <sub>r</sub> (U.C.)	19	22	19	21	20	19
pH <sub>r</sub>	6,58	6,53	6,44	6,50	6,45	6,42

TABLA 11. Resultados ensayo de jarras. T<sub>o</sub> = 60 U.N.T.

Vaso no.	1	2	3	4	5	6
Dosis (ppm)	56	57	58	59	60	61
T <sub>r</sub> (U.N.T.)	5,8	5,3	5,0	4,3	4,6	7,0
C <sub>r</sub> (U.C.)	14	15	15	17	18	21
pH <sub>r</sub>	6,40	6,36	6,07	6,15	6,38	6,33

TABLA 12. Datos iniciales para ensayo de jarras.

Fecha de ensayo : Dic 15/89

 $T_0 = 22$  U.N.T. $C_0 = 33$  U.C.

Alk = 66

 $PH_0 = 7,0$ 

CONDICIONES DE ENSAYO

M.R. = 60 s a 100 rpm

M.L. = 20 min a 40 rpm

SED = 10 min

TABLA 13. Resultados ensayo de jarras. Primera serie.

Vasos No.	1	2	3	4	5	6
Dosis (ppm)	25	30	35	40	45	50
$T_f$ (U.N.T.)	22,0	22,0	16,0	7,0	6,2	3,9
$C_f$ (U.C.)	33	30	29	24	22	16
$T_f/T_0 \times 100$	100,0	100,0	72,7	31,8	28,2	17,7
t form. floc			9 min	5 min	3 min	2 min
I.de Willcomb	0	0	2	8	6	6

TABLA 14. Resultados ensayo de jarras. Segunda serie.

Vasos	1	2	3	4	5	6
Dosis (ppm)	45	50	55	60	65	70
$T_f$ (U.N.T.)	5,5	6,7	5,9	6,2	5,0	3,5
$C_f$ (U.C.)	23	17	18	19	18	20
$T_f/T_0 \times 100$	25,0	30,5	26,8	28,2	22,9	15,9
t form. floc	3 min					
I.de Willcomb	0	0	2	8	6	6

TABLA 15. Resultados ensayo de jarras. Tercera serie.

Vasos No.	1	2	3	4	5	6
Dosis (ppm)	46	49	52	55	58	61
$T_f$ (U.N.T.)	5,2	5,2	4,0	3,3	5,0	3,7
$C_f$ (U.C.)	23	21	19	16	18	14
$T_f/T_o \times 100$	23,6	23,6	18,6	15,0	22,7	16,8

TABLA 16. Resultados ensayo de jarras. Cuarta serie.

Vasos No.	1	2	3	4	5	6
Dosis (ppm)	51	53	54	56	57	59
$T_f$ (U.N.T.)	6,0	6,6	5,9	5,5	5,5	4,3
$C_f$ (U.C.)	19	19	16	17	19	16
$T_f/T_o \times 100$	27,3	30,0	26,2	25,0	25,0	19,5

TABLA 17. Resultados ensayo de jarras. Quinta serie.

Vasos No.	1	2	3	4	5	6
Dosis (ppm)	58	62	66	70	74	78
$T_f$ (U.N.T.)	5,5	5,3	5,0	6,1	4,7	3,5
$C_f$ (U.C.)	17	16	14	15	14	13
$T_f/T_o \times 100$	25,0	24,1	22,7	27,7	21,4	15,9

Del análisis de los datos anteriores podemos inferir que la dosis óptima a aplicar en las condiciones del agua tratada en los días de ensayo, era de cincuenta y siete partes por millón (57 ppm), que fue el valor que reportó una mayor eficiencia remocional de turbiedad.

Los diversos datos de dosis óptima encontrada para cada turbiedad inicial diferente del agua cruda, se analizaron aplicando la teoría de los mínimos cuadrados para obtener las constantes a y b de la ecuación de una línea recta de la forma,

$$y = a + b x$$

y que ajuste al mayor número posible de puntos.

En la anterior ecuación la variable dependiente corresponde al logaritmo del valor de la turbiedad del agua cruda, y la variable independiente x es el valor de la dosis óptima de coagulante a aplicar para la turbiedad presentada.

**5.1.1.2 PH óptimo de coagulación.** El objetivo de este ensayo es el determinar el rango de pH óptimo que caracteriza a la muestra estudiada. Este rango varía con las características del agua cruda y con el coagulante metálico que se emplee.

La concentración de los iones hidrógeno o valor del pH, mide la intensidad de la reacción ácida o alcalina del agua. Esta concentración y la de iones de aluminio es de fundamental importancia en la formación del flóculo.

El valor del pH del agua mezclada con el coagulante tenderá a bajar, al ganar iones hidrógeno en la reacción ácido-base con el sulfato de aluminio. Esta disminución del pH dependerá de la alcalinidad del agua, actuando como una solución amortiguadora. La coagulación requiere generalmente una concentración de alcalinidad igual a la mitad de sulfato de aluminio dosificado para producir la formación adecuada de flóculos.

Al no controlarse debidamente los valores de pH y alcalinidad del agua a tratar podría suceder que el pH del agua en la mezcla rápida se sitúe en un rango en el cual la coagulación no se realiza o se realiza muy pobremente. Es también probable que resultará agua con un pH tan bajo que la hiciera corrosiva, siendo la relación entre la alcalinidad y el pH el factor determinante en lo que se refiere a si el agua formará o no incrustaciones en el sistema de distribución.

El ensayo consistió en una prueba de jarras como la anteriormente descrita, aplicando la dosis óptima

encontrada a las seis jarras. Previamente se modificó el valor del pH inicial de las muestras. Se agregó ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) 1 N o hidróxido de sodio (NaOH) 1 N para bajar o subir el pH, respectivamente.

Ajustado el pH, se espera hasta que se estabilice la muestra y se procede a hacer la prueba de jarras. Al final de la misma se determina turbiedad, pH, color y alcalinidad residual a cada una de las muestras obtenidas.

Los datos de ensayo y los resultados se consignan en las Tablas 18 a 21.

**TABLA 18.** Datos iniciales para ensayo pH óptimo.

Fecha de ensayo : Dic 15/89	
$T_0 = 22$ U.N.T.	Dosis aplicada = 55 ppm
$C_0 = 33$ U.C.	M.R. = 60 s a 100 rpm
Alk = 66	M.L. = 20 min a 40 rpm
$PH_0 = 7.00$	SED = 10 min
Alcali empleado : Hidróxido de sodio 1 N	
Acido empleado : Acido sulfúrico 1 N	

TABLA 19. Resultados ensayo para determinar pH óptimo.

Jarra No.	ml gastados Acido	Alcali	pH <sub>o</sub>	T <sub>r</sub>	C <sub>r</sub>	pH <sub>r</sub>	T <sub>r</sub> /T <sub>o</sub> x 100
1		0,3	8,5	6,0	20	6,76	27,3
2		1,3	9,3	11,0	25	7,24	50,0
3	0,6		6,2	5,0	14	5,92	22,7
4	1,0		5,8	4,8	14	4,90	21,8
5	1,5		5,3	4,7	22	4,10	21,4
6			7,0	4,2	16	6,45	19,1

TABLA 20. Datos iniciales para ensayo pH óptimo.

Fecha de ensayo : Dic 16/89

T<sub>o</sub> = 54 U.N.T.

C<sub>o</sub> = 35 U.C.

Alk = 70

pH<sub>o</sub> = 7,18

Alcali empleado : Hidróxido de sodio 1 N

Acido empleado : Acido sulfúrico 1 N

Dosis aplicada = 58 ppm

M.R. = 60 s a 100 rpm

M.L. = 20 min a 40 rpm

SED = 10 min

TABLA 21. Resultados ensayo para determinar pH óptimo.

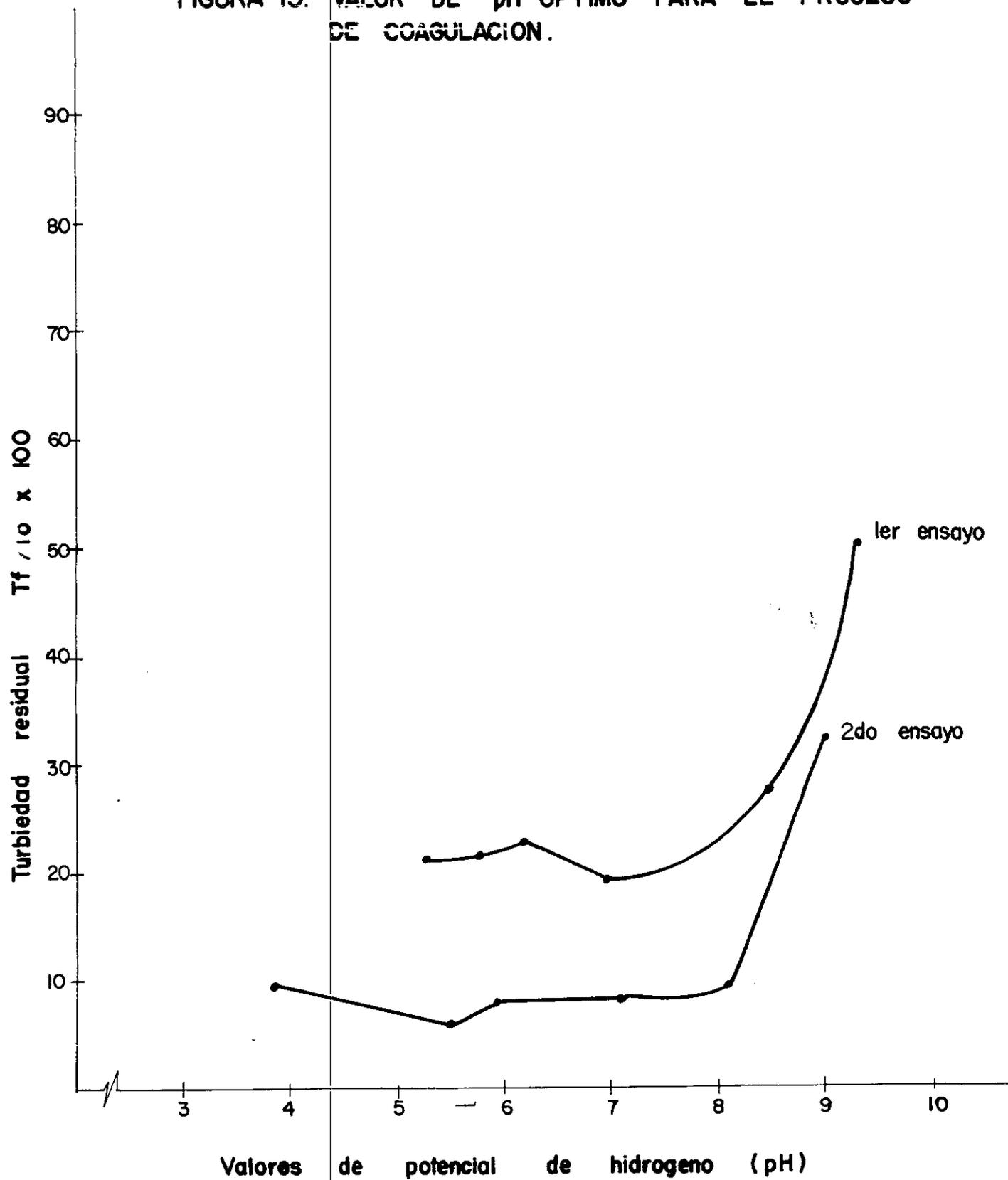
Jarra No.	ml gastados Acido	Alcali	pH <sub>o</sub>	T <sub>r</sub>	C <sub>r</sub>	pH <sub>r</sub>	T <sub>r</sub> /T <sub>o</sub> x 100
1		0,2	8,1	5,0	19	6,55	9,3
2		1,1	9,0	20,0	28	6,99	37,0
3	1,0		5,95	4,3	16	5,24	8,0
4	1,6		5,5	3,1	13	4,50	5,7
5	2,2		3,87	5,2	29	4,08	9,6
6			7,1	4,4	17	6,30	8,1

Estos valores se muestran sobre un plano coordinado en la Figura 15.

El valor óptimo de pH, que produce una mayor reducción de la turbiedad del agua es cercano a nueve. Esto implicaría tener que adicionar un álcali al agua a tratar ya que su valor de pH normal esta entre 6,70 y 7,00.

No obstante este valor, dado por dos ensayos, no es confiable si aceptamos la teoría de investigadores consagrados que dicen que el máximo de remoción de turbiedad se da cuando el agua cruda presenta un pH entre 5,00 y 7,00.

FIGURA 15. VALOR DE pH OPTIMO PARA EL PROCESO DE COAGULACION.



5.1.1.3 **Concentración óptima a la que debe dosificarse el coagulante.** El objetivo de este ensayo es determinar la concentración de la solución de coagulante que dé los mejores resultados en la planta de tratamiento en cuanto a calidad del floc y eficiencia de los procesos posteriores.

Se efectuó una prueba de jarras en la forma convencional aplicando la dosis óptima pero en soluciones de distintas concentraciones.

Los datos de ensayo y resultados obtenidos aparecen consignados en las Tablas 22 y 23.

**TABLA 22.** Datos iniciales para ensayo de concentración óptima.

Fecha : Dic 15/89

$T_0$  = 54 U.N.T.

$C_0$  = 35 U.C.

Alk = 68

$PH_0$  = 7,1

Dosis aplicada = 58 ppm

M.R. = 60 s a 100 rpm

M.L. = 20 min a 40 rpm

SED = 10 min

**TABLA 23.** Resultados de ensayo de jarras para determinar concentración óptima del coagulante.

Jarra No.	Concentracion en porcentaje	ml Solucion aplicados	$T_f$	$C_f$	$T_f/T_o \times 100$
1	0,1	116,00	6,1	18	11,3
2	10,0	1,16	6,6	19	12,2
3	5,0	2,32	6,5	22	12,0
4	2,5	4,64	6,3	19	11,7
5	1,0	11,60	5,6	22	10,4
6	0,5	23,20	4,7	21	8,7

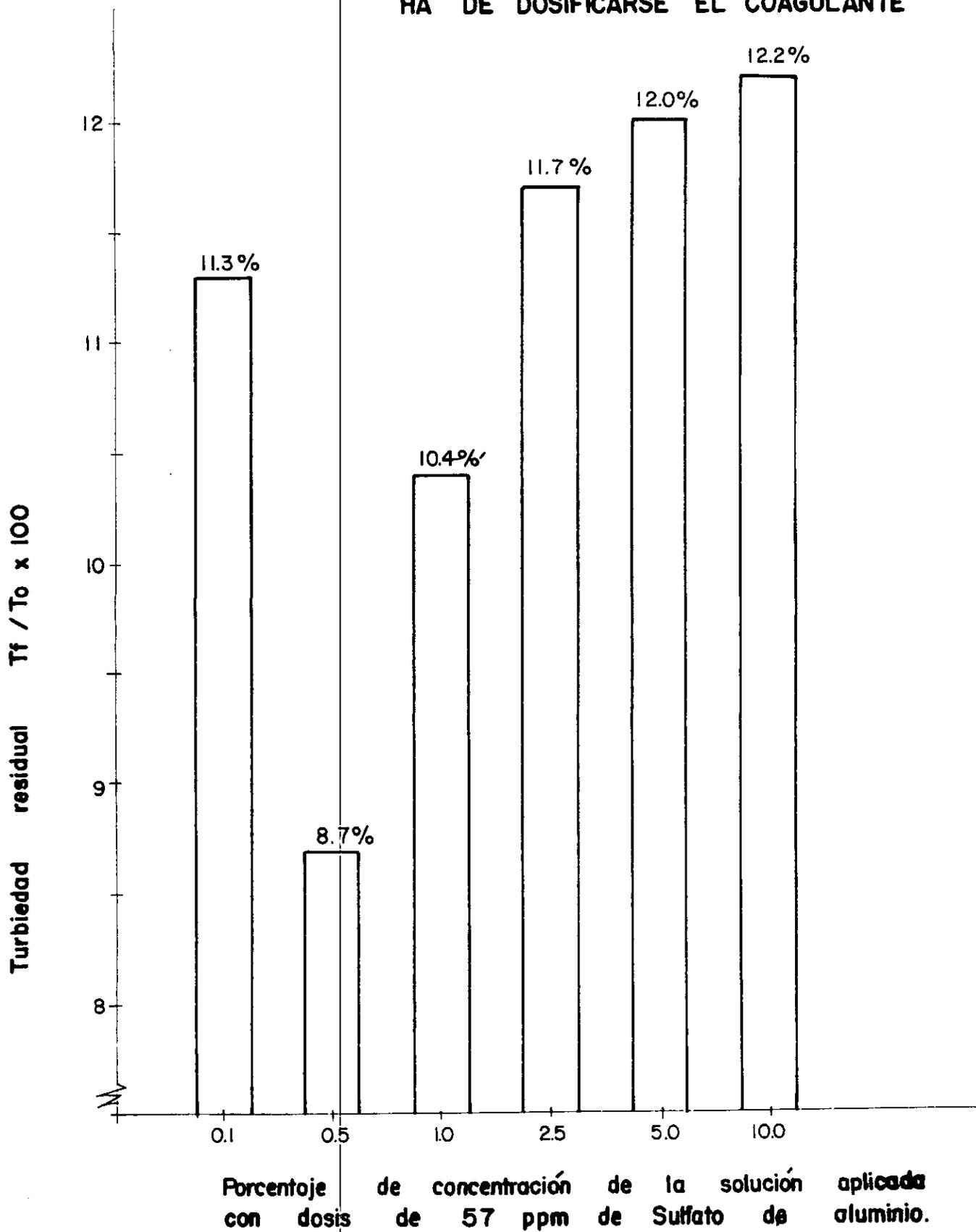
Durante el ensayo se observó que el flóculo aparecía bien definido primero en la jarra número cinco y que al final de la prueba el flóculo más pesado era el de la jarra seis.

De la comparación de turbiedades residuales resultó que la concentración óptima para la muestra analizada era del 0,5% aunque con la concentración del 1% la remoción de turbiedad también fué notoria.

Por resultar más práctico dosificar con solución al 1% de concentración se adoptó esta como la óptima.

En la Figura 16 se muestran los datos obtenidos.

FIGURA 16. CONCENTRACION OPTIMA A LA QUE HA DE DOSIFICARSE EL COAGULANTE



5.1.1.4 Tiempo óptimo de mezcla rápida. El propósito del ensayo es determinar el tiempo óptimo de mezcla rápida es decir el tiempo de agitación que produce una mayor remoción de turbiedad al final de todo el proceso de tratamiento.

El procedimiento seguido fué el siguiente:

- Se determinó turbiedad inicial y dosis óptima del coagulante.

- Se realizó la prueba de jarras convencional pero variando los tiempos de mezcla rápida. Para esto se dispusieron los 6 vasos para la prueba, se prendió el agitador y se fué agregando el coagulante a los vasos a intervalos de tiempo regulares. Dosificado el último vaso se esperó el tiempo de mezcla de éste y se cambió la velocidad del agitador a la correspondiente al proceso de floculación.

Se realizaron múltiples pruebas de jarras procurando cubrir un rango amplio de tiempos de mezclado. En las Tablas 24 a la 30 se copian los datos iniciales y resultados para cinco de estos ensayos.

**TABLA 24.** Datos iniciales. Ensayo de jarras para determinar el tiempo óptimo de mezcla rápida.

Fecha :	
$T_0 = 21$ U.N.T.	Dosis aplicada = 57 ppm
$C_0 = 33$ U.C.	M.R. = t variable a 100 rpm
Alk = 68	M.L. = 20 min a 40 rpm
$PH_0 = 7,0$	SED = 10 min

**TABLA 25.** Resultados de ensayo de jarras para determinar tiempo óptimo de mezcla rápida.

Jarra No.	Tiempo ( s ) Mezcla Rápida	$T_f$	$C_f$	$pH_f$	$T_f/T_0 \times 100$
1	15	3,0	19	6,40	14,3
2	30	2,6	16	6,35	12,4
3	45	4,0	20	6,35	19,0
4	60	4,5	19	6,35	21,4
5	75	4,1	19	6,39	19,5
6	90	4,7	21	6,37	22,4

**TABLA 26.** Datos iniciales. Ensayo de jarras para determinar el tiempo óptimo de mezcla rápida.

Fecha :	
$T_0 = 22$ U.N.T.	Dosis aplicada = 55 ppm
$C_0 = 33$ U.C.	M.R. = t variable a 100 rpm
Alk = 68	M.L. = 20 min a 40 rpm
$PH_0 = 7.0$	SED = 10 min

**TABLA 27.** Resultados de ensayo de jarras para determinar tiempo óptimo de mezcla rápida. Primera serie.

Jarra No.	1	2	3	4	5	6
MR (segundos)	20	40	60	80	100	120
$T_f$ (U.N.T.)	4,0	3,9	4,9	4,6	4,7	5,1
$T_f/T_0 \times 100$	18,2	17,7	22,3	20,9	21,4	23,2

**TABLA 28.** Resultados de ensayo de jarras para determinar tiempo óptimo de mezcla rápida. Segunda serie.

Jarra No.	1	2	3	4	5	6
MR (segundos)	15	30	45	60	75	90
$T_f$ (U.N.T.)	3,1	4,0	5,5	4,4	3,5	4,1
$T_f/T_0 \times 100$	14,1	18,2	25,0	20,0	15,9	18,6

**TABLA 29.** Resultados de ensayo de jarras para determinar tiempo óptimo de mezcla rápida. Tercera serie.

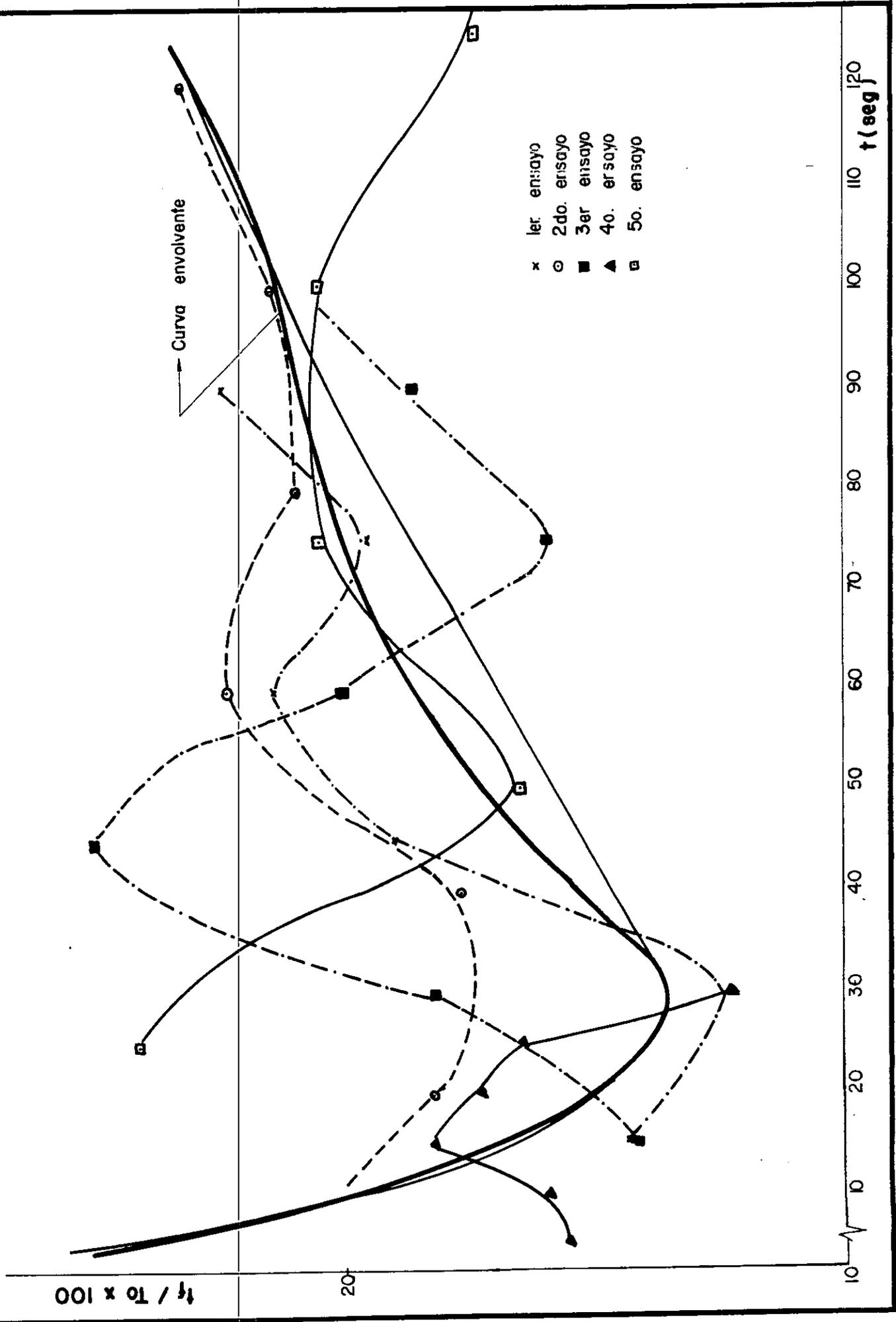
Jarra No.	1	2	3	4	5	6
MR (segundos)	5	10	15	20	25	30
$T_f$ (U.N.T.)	3,4	3,5	4,0	3,8	3,6	2,7
$T_f/T_0 \times 100$	15,5	15,9	18,2	17,3	16,4	12,3

**TABLA 30.** Resultados de ensayo de jarras para determinar tiempo óptimo de mezcla rápida. Cuarta serie.

Jarra No.	1	2	3	4	5	6
MR (segundos)	25	50	75	100	125	150
$T_f$ (U.N.T.)	5,3	3,6	4,5	4,5	3,8	5,6
$T_f/T_0 \times 100$	24,1	16,4	20,5	20,5	17,3	25,5

La mayor eficiencia en la remoción de turbiedad se presentó en las jarras con tiempos de mezcla rápida de treinta (30) segundos, por lo que se adopta este como el tiempo óptimo de agitación. Estos datos se grafican en la Figura 17.

FIGURA 17. TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA



5.1.2 Manejo y almacenamiento de sustancias químicas. Se evaluaron las condiciones que se dan en la planta de tratamiento en la recepción, manejo y almacenamiento de sustancias químicas.

Las sustancias químicas de uso básico en la planta son el sulfato de aluminio y el cloro gaseoso. Eventualmente se compra y mantiene almacenado hipoclorito de sodio. Analizamos aquí lo concerniente a los químicos empleados en el proceso de coagulación.

El sulfato de aluminio es del tipo B. Viene procedente de la fábrica de Productos Químicos Panamericanos S.A. en Barranquilla y el flujo de despachos es continuo.

Su presentación es granulado, empacado en bolsas de polipropileno con bolsa interior de polietileno. Cada bulto contiene 50 kilos de sulfato de aluminio. El material del saco exterior es entretejido lo que permite su almacenamiento en arrumes altos.

El empaque viene rotulado con la siguiente inscripción:

Productos Químicos Panamericanos S.A.  
Sulfato de aluminio tipo B  
Peso neto 50 Kilos  
Producto colombiano  
Medellín, A.A. 4274

Al llegar el despacho a la planta, éste es recibido inicialmente por el operador en turno quien supervisa el descargue, y toma las muestras para el control de calidad.

El descargue se hace a mano por personal contratado por el transportador. Generalmente se hace en la zona de patios, aledaña al montacargas de las plantas uno y dos o en la bodega nueva localizada cerca al elevador de carga de la planta tres. Esto hace que la rotación del producto en la bodega principal no sea continua.

Las especificaciones químicas y físicas del sulfato de aluminio están establecidas por la Norma ICONTEC 531, de Septiembre 13/69. En el laboratorio de la planta se realizan los ensayos normalizados para verificar que el producto recibido cumpla con las especificaciones del mismo. ( Tabla 31 ).

El nivel de calidad mantenido por el proveedor es confiable y sólo en contados eventos ha sido necesario devolver el producto porque no cumple con las especificaciones.

**TABLA 31.** Especificaciones de calidad que debe cumplir el sulfato de aluminio tipo B.

Alúmina soluble total expresada como Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , en % mínimo	15,00%
Hierro soluble total expresado como Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , en % máximo	1,50%
Materias insolubles en agua, en % máximo	10,00%
Basicidad expresada como Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en % mínimo	0,05%
Porcentaje que pasa por el tamiz No. 4	100,00%
Porcentaje que pasa por tamiz No. 100, % máximo	10,00%

Para el almacenamiento de sulfato de aluminio se cuenta con una bodega principal de 400 m<sup>2</sup> de área útil. Está situada entre los tanques de almacenamiento de agua a una distancia de 90 m del punto de elevación a las tolvas del dosificador. No obstante la distancia por el carreteable de acceso es de aproximadamente 400 m .

En el mes de Octubre de 1989 se construyó y puso en servicio una bodega auxiliar de 84 m<sup>2</sup>, con capacidad para almacenar 75 toneladas de sulfato de aluminio. Está situada cerca a las tolvas de dosificación de la planta

tres, y resulta muy útil para hacer la rotación del sulfato de la bodega principal, si se le usa como punto de concentración de los lotes de material más antiguos.

El consumo de sulfato diario promedio en los períodos de alta dosificación es de 3.500 Kg/día para las plantas uno y dos conjuntamente y de 6.500 Kg/día para la planta tres. El total es de 10 toneladas por día.

La zona de almacenamiento de químicos de la planta uno permite almacenar allí aproximadamente 28 toneladas de sulfato de aluminio sin obstaculizar la maniobra de llenado de la tolva. Esto equivale al consumo de siete días.

Es deseable que se mantengan en la planta reservas de sulfato para 30 días. Esta reserva en volumen de almacenamiento está dada por:

$$V_t = \frac{C_a \times T}{d}$$

donde

$V_t$  = Volumen necesario

$C_a$  = Consumo medio diario de sulfato (Kg)

$T$  = Período de reserva (día)

$d$  = Densidad del sulfato (Kg / m<sup>3</sup>)

$$V_t = \frac{10.000 \text{ Kg/día} \times 30 \text{ días}}{1.060 \text{ Kg/m}^3} = 283 \text{ m}^3$$

Esta capacidad de almacenamiento es excedida por la instalada en la planta, si consideramos que un arrume de 12 bultos tiene 2,2 m de altura y que el área total de bodegas es de 500 m² aproximadamente. Así el volumen útil de almacenamiento es de 1.100 m³.

Al inspeccionar las bodegas encontramos existencias de sulfato del orden de las 300 toneladas. Es objetable que los distintos lotes no se encuentren identificados con la fecha de llegada ni apilado con un orden establecido lo que dificulta en un momento dado establecer rápidamente el nivel de existencias. Así mismo es notoria la falta de estibas que protejan el sulfato de la humedad del piso.

En cuanto al manejo del sulfato, las maniobras ejecutadas son: cargue al hombro de los bultos de sulfato hasta el elevador, movimiento de los mismos dentro de la bodega, y llenado de tolvas. Esta última actividad está asignada a los ayudantes de operación y las dos primeras a los ayudantes de patio.

Todos los empleados encargados de estas maniobras cuentan con los debidos equipos de protección, máscaras y gafas los cuales usan regularmente.

**5.1.3 Dosificación de sustancias químicas.** La dosificación de las sustancias químicas o sulfato de aluminio es el principal control que puede hacerse al proceso de coagulación. El que se den las reacciones necesarias para la formación de un flóculo grande y pesado al aplicar la dosis óptima de sulfato encontrada en el laboratorio, depende de la exactitud con que se haga la dosificación.

La aplicación de la solución de sulfato se hace sobre el tubo de  $\varnothing = 0,61$  m que trae el agua a la cámara de mezcla rápida. Para controlar la dosis a aplicar se tiene un dosificador volumétrico, marca Wallace & Tierman serie 32-055. Es de transmisión por correa tipo V, con tolva en fibra de vidrio, tornillo dosificador sinfín, y con agitación hidráulica en el tanque de dilución, también de fibra de vidrio.

El motor del mismo es monofásico marca Horney Well, tipo 8.146 de 1/6 H.P, 90 V, 1,60 Amp y 1.800 rpm.

Para determinar la exactitud de dosificación del aparato se procedió de la siguiente forma:

- Llenamos la tolva hasta 3/4 partes de su capacidad.
- Tomamos tres muestras durante un minuto cada una para

distintas graduaciones de dosificación, así: En el punto actual de dosificación, en los puntos mínimos, 1/4, 1/2, 3/4 y máximo.

- Graficando porcentaje de apertura del dosificador vs. peso de las muestras tomadas, encontramos la curva de calibración del aparato, la cual comparamos con la suministrada por el fabricante.

Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 32 y en la Figura 18.

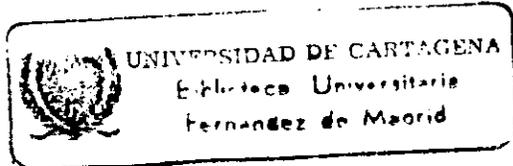
**TABLA 32.** Peso de muestras para determinar grado de exactitud del dosificador de sulfato de aluminio.

Abertura (%)	Pesos obtenidos (grs)				Dosificado Kg/hora
	1ª muestra	2ª muestra	3ª muestra	Promedio gr/min	
Mínima (5)	220	206	232	219,3	13,2
25	430	490	455	458,3	27,5
50	845	920	896	887,0	53,2
75	1480	1550	1630	1553,3	93,2
Máxima	2480	2542	2624	2548,7	152,9

FIGURA 18. CURVA DE CALIBRACION DEL DOSIFICADOR PLANTAS 1 y 2

Peso dosificado (grs/min)

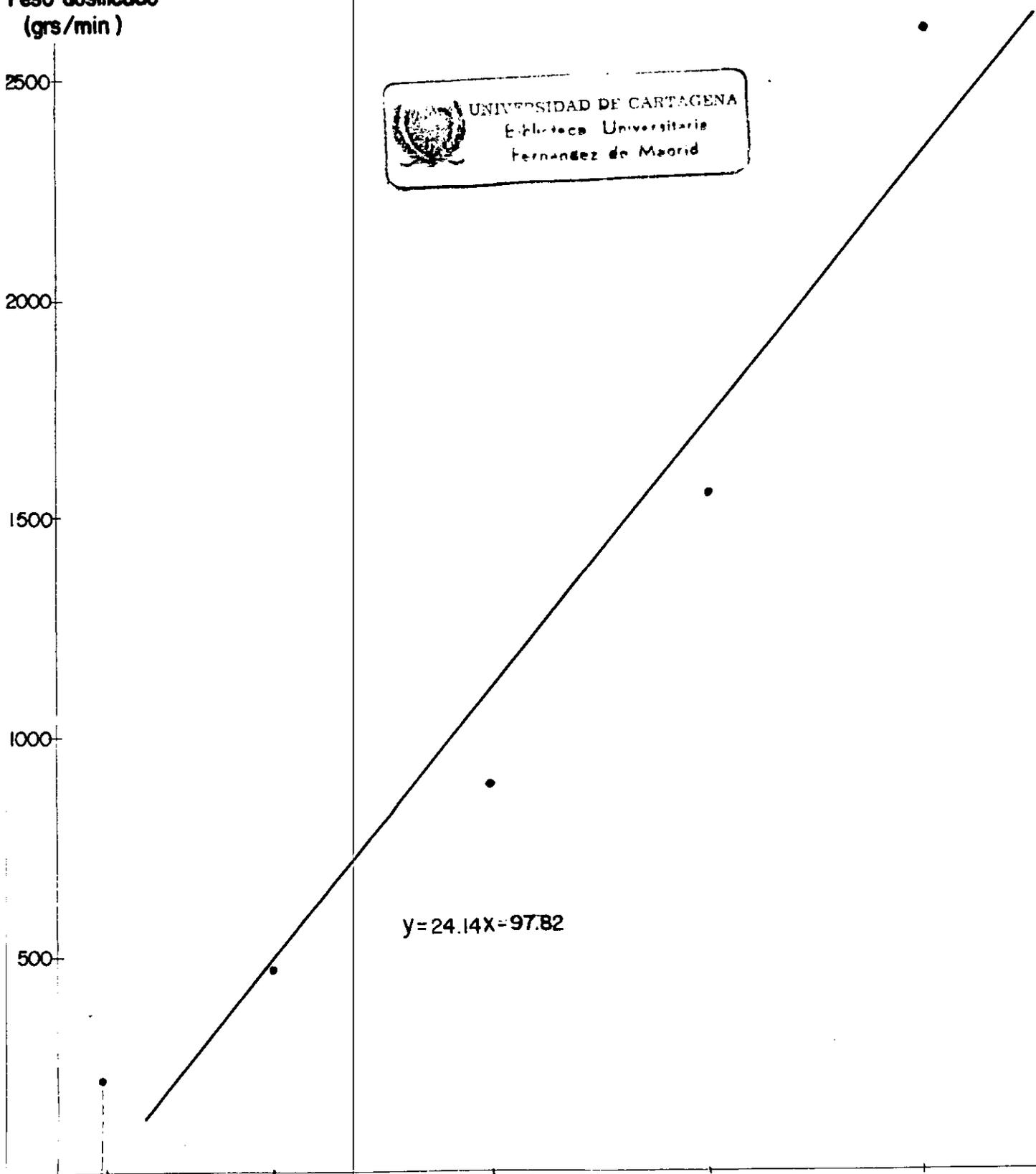
2500  
2000  
1500  
1000  
500



$$y = 24.14x - 97.82$$

Porcentaje apertura del dosificador

5 25 50 75 100



La dosis óptima a aplicar encontrada en la prueba de jarras para las condiciones del agua de ese día era de 55 ppm. Esta dosis se correlaciona con el peso que debe arrojar el dosificador mediante la siguiente ecuación, y que incluye además la calidad del coagulante.

$$P = \frac{3,6}{10^3} \times \frac{100 \times D \times Q}{100 - I}$$

donde

P es el peso en kilos arrojado por hora

D es la dosis óptima a aplicar

Q el caudal (lps)

I el porcentaje de insolubles del coagulante.

En los momentos del ensayo, Q = 690 lps, D = 55 ppm e I = 9%, entonces el peso a dosificar teóricamente es

$$P = \frac{3,6}{10^3} \times \frac{100 \times 55 \times 690}{100 - 9} = 150,1 \text{ Kg/h}$$

Si este peso teórico corresponde en la curva de peso real a 130 Kg entonces el grado de exactitud del dosificador ( I ) sería en ese momento de:

$$I = 100 - \frac{P_r}{P_t} \times 100 = 100 - \frac{130}{150,1} \times 100 = 13,4$$

Y aplicando el criterio indicado en la Tabla 33, decimos que el grado de exactitud del dosificador es regular.

**TABLA 33.** Calificación de la exactitud del dosificador de sulfato de aluminio.

Exactitud del dosificador	Valor de I
Muy buena	< 5
Buena	5 - 10
Regular	10 - 15
Deficiente	> 15

Debe anotarse que la curva teórica de calibración no se consiguió en la planta y el anterior análisis califica es la exactitud entre lo que creía el operador en turno estar dosificando y lo que dosificaba realmente.

No obstante, preguntando sobre el funcionamiento del equipo a los operadores concluimos que:

- La curva de calibración encontrada con el procedimiento antes descrito no es aplicable en la mayoría de los casos pues por factores diversos para una misma apertura del dosificador va cambiando el peso de sulfato que este arroja en el tiempo. Entre estos factores se menciona el estado de limpieza del sinfín, la altura de llenado en las tolvas, y la humedad atmosférica.

- El control de la dosificación lo hace el operador en forma horaria determinando el peso arrojado por minuto y así lo consignan en la hoja de operaciones.

Se determinó además el grado de concentración de la solución, con el peso real dosificado y el caudal de agua que entra a la cámara de solución así:

Volumen del tanque de solución : 160 litros

Caudal que llega al tanque de solución:

mínimo	6	l/min.
actual	18	l/min.
máximo	24	l/min.

Grado de concentración C:

$$C = \frac{P_r}{q} \times 100 = \frac{150,1}{18 \times 60} \times 100 = 14 \%$$

Este valor está muy por encima del de la concentración óptima encontrada en el laboratorio que es del 1 %.

Se determinó también que el periodo de retención de la cámara de solución :

$$T = \frac{V}{Q} = \frac{160 \text{ l}}{18 \text{ l/min}} = 8,9 \text{ min}$$

La flexibilidad del dosificador está dada por el rango en el que es posible dosificar, esto es:

$$\begin{aligned}
 F &= P_{\text{máx.}} - P_{\text{mín.}} \\
 &= 152,9 - 13,2 \\
 &= 139,7 \\
 &= 140 \text{ Kg/h}
 \end{aligned}$$

5.1.4 Evaluación de la mezcla rápida. El dispositivo utilizado para provocar la agitación o turbulencia que favorece la desestabilización de las partículas en suspensión por la reacción entre los coagulantes y el agua se denomina unidad de mezcla rápida.

Dos ejemplos típicos de mezcladores usados con mucha frecuencia en las plantas de tratamiento de agua son el resalto hidráulico y la turbina de eje vertical.

Las primeras plantas de tratamiento no tenían un dispositivo especial para hacer la mezcla de los coagulantes con el agua. Fue hacia el año de 1927 que J.M. Elms patentó el resalto hidráulico para ser usado en la planta de tratamiento de Detroit. Posteriormente con el avance de la tecnología se impusieron los mezcladores de turbina de eje vertical.

A las plantas de tratamiento uno y dos fue traída esta tecnología "importada" con la consecuencia lógica de que al no existir en ese momento en nuestro medio la técnica necesaria para su correcto uso y mantenimiento, al poco tiempo resultaron deteriorados estos equipos.

Fue preciso entonces acondicionar estas unidades al de tipo hidráulico, aprovechando la energía producida por un ensanchamiento brusco de la sección de la conducción del agua después de aplicado el coagulante.

En los siguientes apartes se estudia hasta que punto esta unidad así acondicionada suple los requerimientos de agitación y mezcla rápida deseables para la calidad del agua en tratamiento.

Para su evaluación se determinó:

- Eficiencia comparativa del proceso
- Tiempo de mezcla
- Intensidad de mezcla
- Condiciones hidráulicas de las obras de interconexión.

5.1.4.1 Eficiencia comparativa del proceso. Se trata en este ensayo de simular a nivel de laboratorio en un ensayo de jarras las condiciones ideales de mezcla rápida antes encontradas y las de floculación existentes en la planta. Después del período de sedimentación, determinamos la turbiedad residual y calculamos el parámetro llamado Índice de aglomeración aparente (AL), definido como la diferencia entre los inversos multiplicativos de la turbiedad final e inicial.

$$AL = \frac{1}{T_f} - \frac{1}{T_o}$$

Este índice de aglomeración en laboratorio al compararsele con el de la planta nos dá una idea de la eficiencia de la unidad de mezcla rápida.

Para encontrar el índice de aglomeración de la planta (AP), tomamos muestras en jarras de dos litros del agua que llega a los floculadores y en el menor tiempo posible las trasladamos al laboratorio. Allí las sometemos a las mismas condiciones de floculación y sedimentación del ensayo anterior. Tomamos lecturas de turbiedad final y calculamos el índice de aglomeración aparente en la planta.

La eficiencia de la cámara de mezcla rápida estará dada por:

$$I = \frac{A_p}{A_L} \times 100$$

Para calificar la eficiencia utilizamos los términos indicados en la Tabla 34.

**TABLA 34.** Calificación de la eficiencia de la cámara de mezcla rápida.

Eficiencia	Valor de I
Muy buena	90
Buena	70 - 90
Regular	50 - 70

Las condiciones de ensayo y los resultados encontrados son los siguientes:

Dosis : 59 ppm                      M.R. = 60 s a 100 rpm  
 $T_o$  = 47 U.N.T.                      M.L. = 20 min. a 40 rpm  
 $C_o$  = 33 U.C.                          SED= 10 min.

$$A_L = \frac{1}{T_f} - \frac{1}{T_o} = \frac{1}{2,8} - \frac{1}{47} = 0,34$$

En la planta

$$A_P = \frac{1}{T_f} - \frac{1}{T_o} = \frac{1}{40} - \frac{1}{47} = 0,23$$

Eficiencia:

$$I = \frac{A_P}{A_L} \times 100 = \frac{0,23}{0,34} \times 100 = 68 \%$$

Calificamos así como de regular la eficiencia de la mezcla rápida. Aquí debe hacerse la salvedad de que por no haber disponibilidad de una equipo modificado de jarras no puede encontrarse el índice de aglomeración de laboratorio correspondiente al gradiente de agitación óptimo de la mezcla rápida.

#### 5.1.4.2 Tiempo de retención de la unidad de mezcla rápida.

El tiempo de retención se determinó mediante una serie de ensayos con trazadores que también sirvieron para caracterizar las condiciones hidráulicas de los conductos de comunicación entre la cámara de mezcla rápida y los floculadores.

La sustancia utilizada como trazadora fué el cloruro de sodio o sal común. La prueba consistió en forma genérica, en dosificar la sustancia trazadora y tomar una serie de muestras a la salida de la unidad. Posteriormente a esas muestras se les determinó la concentración de cloruros. Se tabularon estos resultados y se analizaron aplicando el modelo simplificado de Wolf y Resnick.

Mediante este análisis determinamos si predomina el flujo a pistón, el flujo mezclado o el combinado o no ideal. Así mismo nos permite detectar la presencia de zonas muertas y/o cortocircuitos.

Para una mayor ilustración sobre ensayos con trazadores puede consultarse el anexo B de este informe donde se ha hecho un resumen de la bibliografía consultada.

La secuencia seguida para realizar estas pruebas es la siguiente:

Se determinó el caudal afluente a la cámara de mezcla rápida, y se calculó el peso de trazador necesario para hacer la prueba con el método de dosificación instantánea, como sigue:

Caudal afluente =  $60.000 \text{ m}^3/\text{d} = 694 \text{ lps.}$

Volumen de la unidad =  $76,8 \text{ m}^3$

Volumen útil =  $64,4 \text{ m}^3$

Concentración inicial de cloruros:  $20,7 \text{ mg/l}$

Tiempo teórico de retención:

$$T = \frac{V}{Q} = \frac{64,4 \text{ m}^3}{0,694 \text{ m}^3/\text{s}} = 92,8 \text{ s}$$

Concentración promedio de cloruros esperados en la prueba:

$50 \text{ mg/l.}$

Para estimar el peso necesario de la sustancia trazadora usamos la siguiente fórmula:

$$W = \frac{V \times C \times K}{P}$$

donde :

W es el peso en gramos del trazador, en nuestro caso, sal común no refinada.

V es el volumen útil de la unidad en m<sup>3</sup>.

C es la concentración promedio esperada en mg/l de la sustancia trazadora, cloruros.

K es la constante de conversión para expresar W en función del peso de los cloruros.

P es el grado de pureza del trazador. La sal empleada para este ensayo tenía una pureza del 98,5 %.

El valor de K está dado por la siguiente relación entre pesos atómicos:

$$K = \frac{\text{Peso del NaCl}}{\text{Peso del Cl}^-} = \frac{23 + 35,5}{35,5} = 1,65$$

Así la cantidad de sal requerida por ensayo fué de:

$$W = \frac{64,4 \times 50 \times 1,65}{0,985 \times 1.000 \text{ gr/Kg}} = 5,39 \text{ Kg}$$

Esta cantidad de sal diluida, se arrojó al tubo por donde se hace la dosificación de sulfato de aluminio en solución. Los puntos de toma de muestras se localizaron como se indica en la Figura 19.

En un primer ensayo se tomaron 52 muestras por punto: Una cada seis segundos durante los primeros cuatro minutos y luego una cada diez segundos. Los datos obtenidos están contenidos en la Tabla 35 y las gráficas correspondientes en las Figuras 20 a 22.

FIGURA 19. SITIO DE MUESTREOS PARA ENSAYO DE TRAZADORES EN LA UNIDAD DE MEZCLA RAPIDA.

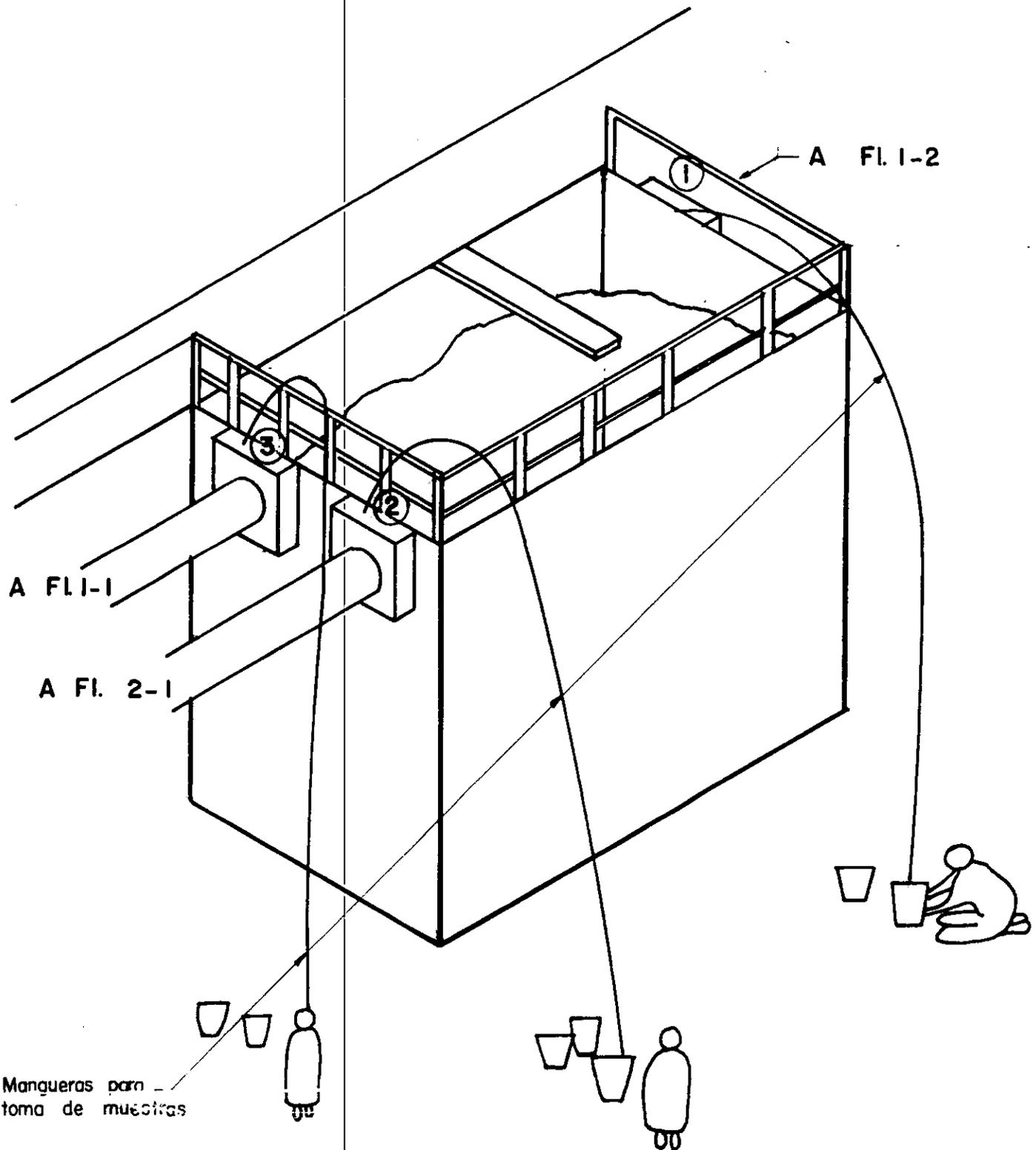


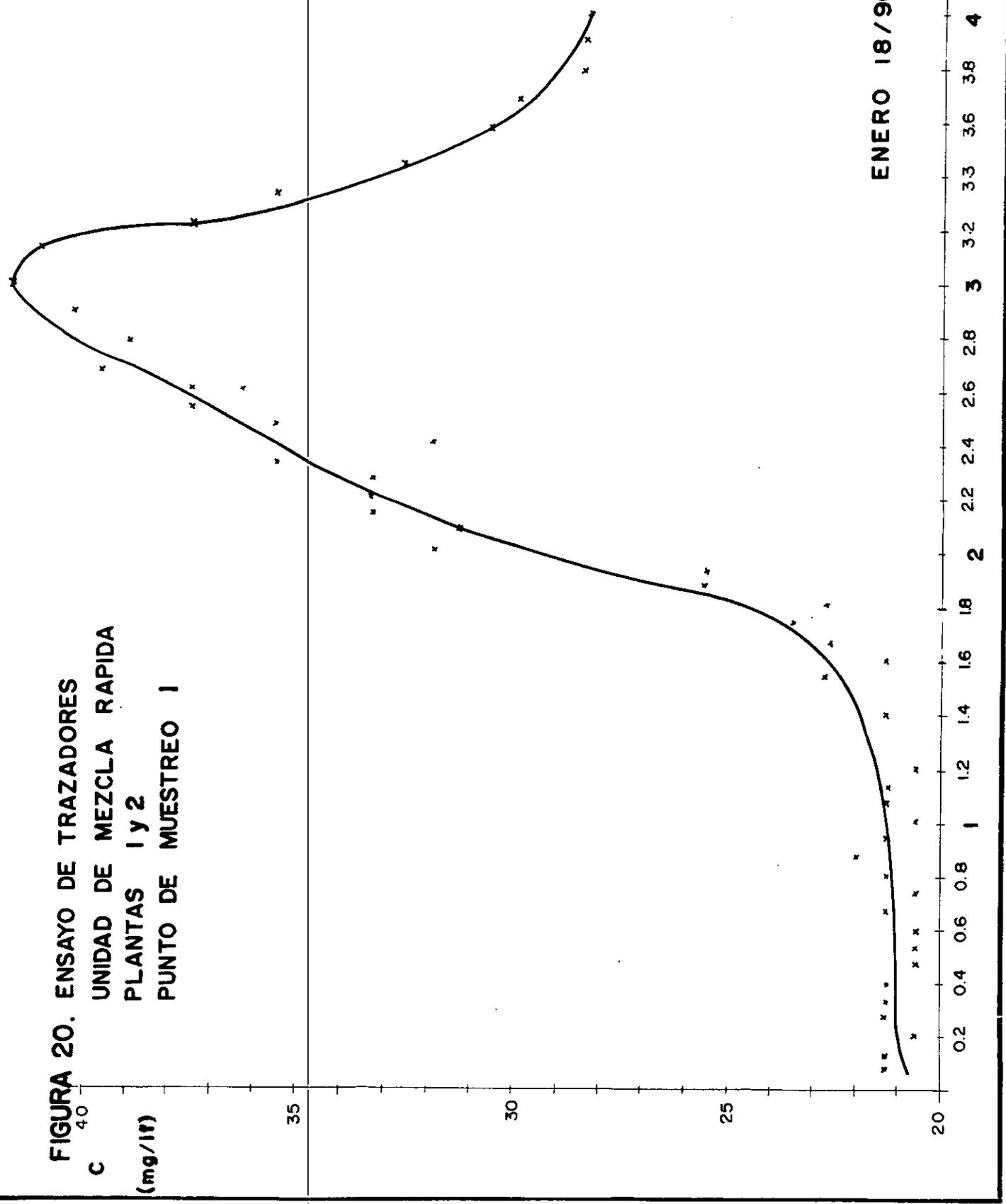
TABLA 35. Datos de Ensayo de trazadores en la unidad de Mezcla rápida. Enero 18 de 1990.

Número de orden de muestra	t seg	PUNTO 1		PUNTO 2		PUNTO 3	
		AgNO <sub>3</sub> ml	Cloruros mg/lit	AgNO <sub>3</sub> ml	Cloruros mg/lit	AgNO <sub>3</sub> ml	Cloruros mg/lit
1	6	3,0	21,3	2,9	20,6	4,0	28,4
2	12	3,0	21,3	2,9	20,6	4,0	28,4
3	18	2,9	20,6	2,7	19,1	4,3	30,5
4	24	3,0	21,3	3,2	22,7	4,2	29,8
5	30	3,0	21,3	1,9	13,5	4,1	29,1
6	36	3,0	21,3	2,6	18,4	4,0	28,4
7	42	2,9	20,6	2,6	18,4	4,0	28,4
8	48	2,9	20,6	2,7	19,1	4,1	29,1
9	54	2,9	20,6	2,5	17,7	4,4	31,2
10	60	3,0	21,3	2,7	19,1	4,2	29,8
11	66	2,9	20,6	2,7	19,1	4,3	30,5
12	72	3,0	21,3	2,6	18,4	4,3	30,5
13	78	3,1	22,0	2,8	19,9	4,5	31,9
14	84	3,0	21,3	2,9	20,6	4,6	32,6
15	90	2,9	20,6	3,0	21,3	4,7	33,3
16	96	3,0	21,3	2,9	20,6	4,5	31,9
17	102	3,0	21,3	3,1	22,0	5,1	36,2
18	108	2,9	20,6	3,3	23,4	5,0	35,5
19	114	3,0	21,3	3,4	24,1	5,7	40,4
20	120	3,0	21,3	3,5	24,8	4,7	33,3
21	126	3,0	21,3	3,8	26,9	5,5	39,0
22	132	3,0	21,3	3,8	26,9	5,7	40,4
23	138	3,2	22,7	4,0	28,4	6,5	46,1
24	144	3,0	21,3	3,7	26,2	5,9	41,8
25	150	3,2	22,7	4,2	29,8	6,1	43,3
26	156	3,3	23,4	4,1	29,1	6,2	44,0
27	162	3,2	22,7	4,4	31,2	6,5	46,1
28	168	3,6	25,5	4,6	32,6	6,0	42,6
29	174	3,6	25,5	4,6	32,6	6,0	42,6
30	180	4,5	31,9	4,5	31,9	6,0	42,6
31	186	4,4	31,2	4,9	34,8	6,5	46,1
32	192	4,7	33,3	5,4	38,3	7,0	49,6

TABLA 35. Datos de Ensayo de trazadores en la unidad de Mezcla rápida. Enero 18 de 1990.

Número de orden de muestra	t seg	PUNTO 1		PUNTO 2		PUNTO 3	
		AgNO <sub>3</sub> ml	Cloruros mg/lit	AgNO <sub>3</sub> ml	Cloruros mg/lit	AgNO <sub>3</sub> ml	Cloruros mg/lit
33	198	4,7	33,3	4,3	30,5	6,7	47,5
34	204	4,7	33,3	6,1	43,3	6,2	44,0
35	210	5,0	35,5	6,2	44,0	6,5	46,1
36	216	4,5	31,9	6,2	44,0	6,0	42,6
37	222	5,0	35,5	6,2	44,0	5,5	39,0
38	228	5,3	37,6	6,3	44,7	5,5	39,0
39	234	5,3	37,6	6,2	44,0	5,2	36,9
40	240	5,6	39,7	6,2	44,0	4,8	34,0
41	250	5,5	39,0	5,7	40,4	4,7	33,3
42	260	5,7	40,4	5,5	39,0	4,6	32,6
43	270	5,9	41,8	5,1	36,2	4,3	30,5
44	280	5,8	41,1	4,9	34,8	4,2	29,8
45	290	5,3	37,6	4,8	34,0	4,0	28,4
46	300	5,0	35,5	3,3	23,4	4,0	28,4
47	310	4,6	32,6	3,5	24,8	4,0	28,4
48	320	4,3	30,5	3,5	24,8	3,8	26,9
49	330	4,2	29,8	4,0	28,4	3,6	25,5
50	340	4,0	28,4	3,8	26,9	3,7	26,2
51	350	4,0	28,4	3,6	25,5	3,8	26,9
52	360	4,0	28,4	3,5	24,8	3,6	25,5

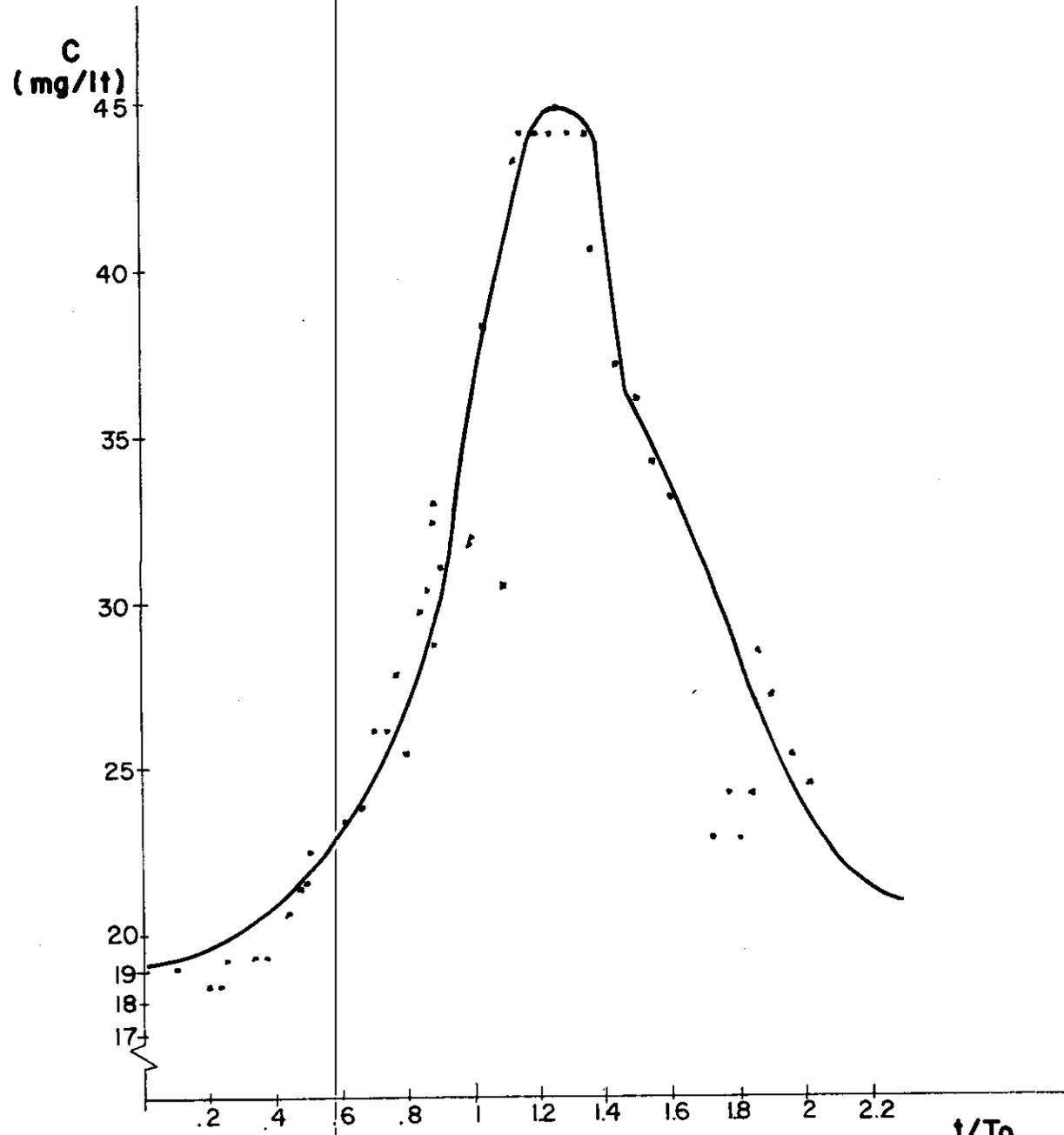
FIGURA 20. ENSAYO DE TRAZADORES  
UNIDAD DE MEZCLA RAPIDA  
PLANTAS 1 y 2  
PUNTO DE MUESTREO 1



ENERO 18/90

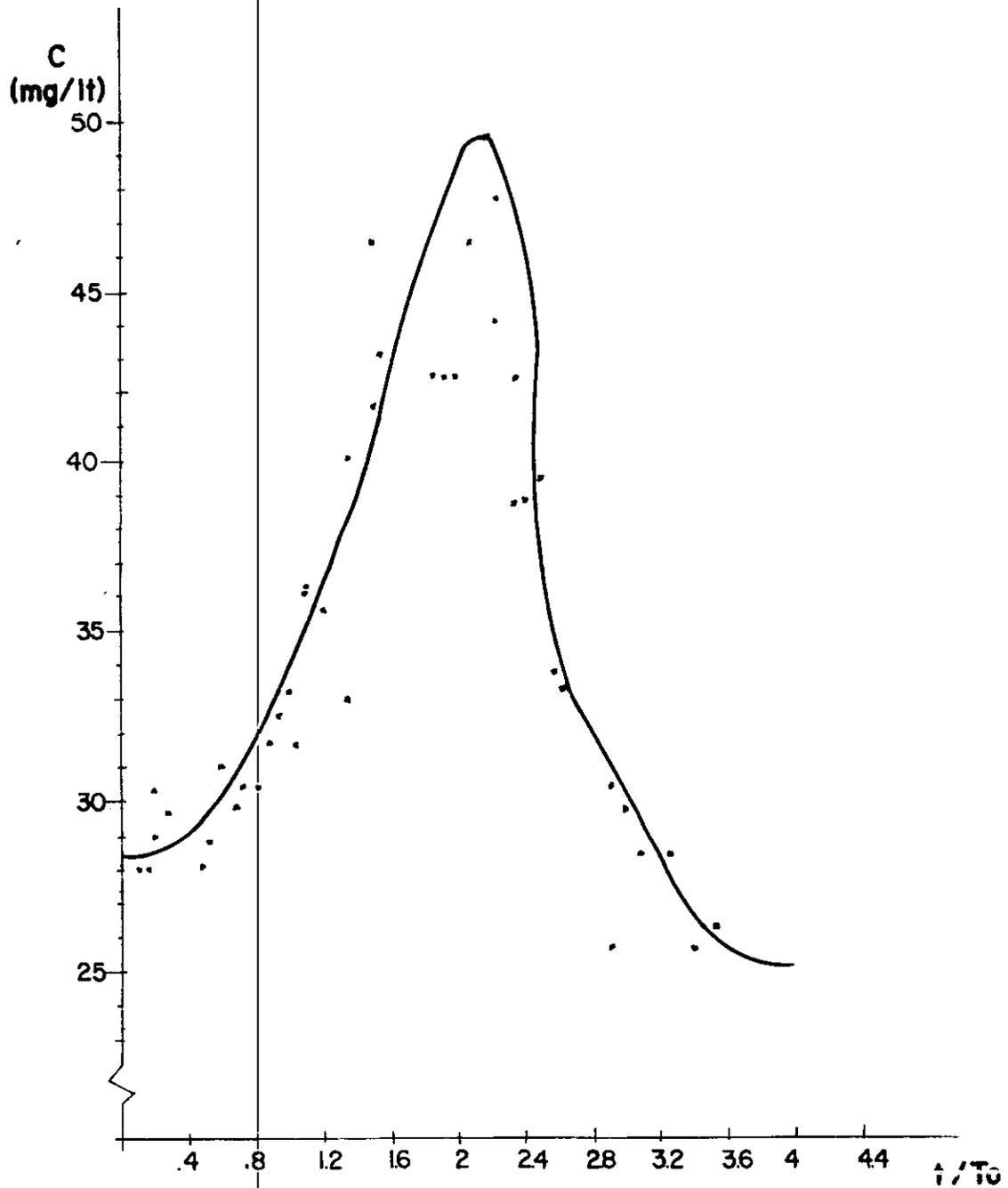


FIGURA 21. ENSAYO DE TRAZADORES  
UNIDAD DE MEZCLA RAPIDA  
PLANTAS 1 y 2  
PUNTO DE MUESTREO 2



$1/T_0$   
ENERO 18/90

FIGURA 22. ENSAYO DE TRAZADORES  
UNIDAD DE MEZCLA RAPIDO  
PLANTAS 1 y 2  
PUNTO DE MUESTREO 3



ENERO 18/90

Para cada serie de muestras se establecen los siguientes parámetros útiles para determinar el tipo de flujo predominante.

$\phi$  = Tiempo en que inicia su aparición el trazador.

$\tan \alpha$  = Pendiente de la recta de la función  $1-F(t)$ , donde  $1-F(t)$  es el porcentaje de trazador remanente en la unidad en donde se hace el ensayo en el instante  $t$ .

$T_p$  = Tiempo real de detención del agua en la unidad estudiada. Corresponde al tiempo en que se presenta la máxima concentración del trazador.

$t_{10}$  = Tiempo en el que ha salido el 10% del total de trazador de la unidad.

$t_{50}$  = Tiempo en el que ha pasado el 50% del trazador.

$t_{90}$  = Tiempo en el que ha pasado el 90% del trazador.

Conocidos estos parámetros, se determinan las funciones de flujo así:

$$\text{Zonas muertas: } m = 1 - \frac{\phi}{p} \quad \text{donde } p = \frac{\phi \tan \alpha}{0,434 + \phi \tan \alpha}$$

Fracción de flujo a pistón =  $p ( 1 - m ) = \phi$

Fracción de flujo mezclado =  $( 1 - p ) ( 1 - m )$

Luego encontramos la concentración inicial de cloruros, según el modelo adoptado como:

$$C_0 = \frac{Q \cdot \delta t \cdot \Sigma Cl}{(1-p)(1-m)V}$$

, donde todos los términos son ya conocidos.

Finalmente establecemos la ecuación de la curva de la función  $1 - F(t)$  según el modelo simplificado de Wolf - Resnick y la cual es de la forma:

$$C_t = C_0 e^{-\frac{1}{(1-p)(1-m)} \left[ \frac{t}{T_0} - p(1-m) \right]}$$

De la tabla de datos se toman los excesos de cloruros sobre los iniciales para cada 10 s y se determinan los porcentajes de trazador remanente en la unidad en los distintos tiempos. Estos cálculos se muestran en la Tabla 36. Los porcentajes de trazador se grafican en papel semi-log en las Figuras 23 a 25. Los puntos en la gráfica corresponden a una recta cuya ecuación se encuentra aplicando el ajuste por mínimos cuadrados.

A continuación se incluye el análisis antes detallado para cada uno de los puntos de muestreo.

De los diversos ensayos realizados, podemos resumir que el tiempo de retención de la unidad de mezcla rápida es de 45 segundos. Este tiempo corresponde al de agitación pues se encontró predominio de flujo mezclado.

TABLA 36. Resultados Ensayo de Trazadores en la Unidad de Mezcla Rápida. Plantas uno y dos. Enero 18 de 1990

T<sub>0</sub> = 90 segundos

PUNTO 1

PUNTO 2

PUNTO 3

Número de orden	t (s)	t/T <sub>0</sub>	PUNTO 1				PUNTO 2				PUNTO 3			
			C-C <sub>0</sub> mg/lt	Σ(C-C <sub>0</sub> )	F(t)	1-F(t)	C-C <sub>0</sub> mg/lt	Σ(C-C <sub>0</sub> )	F(t)	1-F(t)	C-C <sub>0</sub> mg/lt	Σ(C-C <sub>0</sub> )	F(t)	1-F(t)
1	6	0,07	0,4	0,40	0,00	1,00	0,0	0,00	0,00	1,00	8,1	8,10	0,01	0,99
2	12	0,13	0,4	0,80	0,00	1,00	0,0	0,00	0,00	1,00	8,1	16,20	0,02	0,98
3	18	0,20	0,4	1,20	0,00	1,00	0,0	0,00	0,00	1,00	8,2	24,40	0,03	0,97
4	24	0,27	0,4	1,60	0,00	1,00	0,0	0,00	0,00	1,00	8,3	32,70	0,04	0,96
5	30	0,33	0,4	2,00	0,00	1,00	0,0	0,00	0,00	1,00	8,5	41,20	0,05	0,95
6	36	0,40	0,4	2,40	0,01	0,99	0,0	0,00	0,00	1,00	8,7	49,90	0,06	0,94
7	42	0,47	0,4	2,80	0,01	0,99	0,0	0,00	0,00	1,00	8,9	58,80	0,07	0,93
8	48	0,53	0,4	3,20	0,01	0,99	0,0	0,00	0,00	1,00	9,3	68,10	0,08	0,92
9	54	0,60	0,4	3,60	0,01	0,99	0,0	0,00	0,00	1,00	9,7	77,80	0,09	0,91
10	60	0,67	0,4	4,00	0,01	0,99	0,0	0,00	0,00	1,00	10,2	88,00	0,10	0,90
11	66	0,73	0,4	4,40	0,01	0,99	0,0	0,00	0,00	1,00	10,6	98,60	0,11	0,89
12	72	0,80	0,5	4,90	0,01	0,99	0,0	0,00	0,00	1,00	11,3	109,90	0,13	0,87
13	78	0,87	0,6	5,50	0,01	0,99	0,3	0,30	0,00	1,00	12,2	122,10	0,14	0,86
14	84	0,93	0,7	6,20	0,01	0,99	0,7	1,00	0,00	1,00	12,9	135,00	0,16	0,84
15	90	1,00	0,7	6,90	0,01	0,99	1,0	2,00	0,00	1,00	13,7	148,70	0,17	0,83
16	96	1,07	0,7	7,60	0,02	0,98	1,5	3,50	0,01	0,99	14,4	163,10	0,19	0,81
17	102	1,13	0,8	8,40	0,02	0,98	2,0	5,50	0,01	0,99	15,5	178,60	0,21	0,79
18	108	1,20	0,9	9,30	0,02	0,98	2,7	8,20	0,01	0,99	16,0	194,60	0,23	0,77
19	114	1,27	1,0	10,30	0,02	0,98	3,4	11,60	0,02	0,98	16,9	211,50	0,25	0,75
20	120	1,33	1,1	11,40	0,02	0,98	4,0	15,60	0,03	0,97	17,8	229,30	0,27	0,73
21	126	1,40	1,3	12,70	0,03	0,97	4,7	20,30	0,04	0,96	18,7	248,00	0,29	0,71
22	132	1,47	1,4	14,10	0,03	0,97	5,4	25,70	0,05	0,95	19,6	267,60	0,31	0,69
23	138	1,53	1,7	15,80	0,03	0,97	6,5	32,20	0,06	0,94	20,4	288,00	0,34	0,66
24	144	1,60	2,0	17,80	0,04	0,96	7,5	39,70	0,07	0,93	21,3	309,30	0,36	0,64
25	150	1,67	2,4	20,20	0,04	0,96	8,5	48,20	0,09	0,91	22,6	331,90	0,39	0,61
26	156	1,73	3,0	23,20	0,05	0,95	9,3	57,50	0,10	0,90	23,7	355,60	0,41	0,59
27	162	1,80	3,9	27,10	0,06	0,94	10,2	67,70	0,12	0,88	25,2	380,80	0,44	0,56
28	168	1,87	5,7	32,80	0,07	0,93	10,9	78,60	0,14	0,86	26,4	407,20	0,47	0,53
29	174	1,93	7,3	40,10	0,08	0,92	12,2	90,80	0,17	0,83	27,7	434,90	0,51	0,49
30	180	2,00	8,8	48,90	0,10	0,90	13,2	104,00	0,19	0,81	28,7	463,60	0,54	0,46
31	186	2,07	10,0	58,90	0,12	0,88	14,7	118,70	0,22	0,78	29,0	492,60	0,57	0,43
32	192	2,13	11,4	70,30	0,15	0,85	17,6	136,30	0,25	0,75	29,0	521,60	0,61	0,39
33	198	2,20	12,3	82,60	0,17	0,83	20,1	156,40	0,29	0,71	28,3	549,90	0,64	0,36
34	204	2,27	13,1	95,70	0,20	0,80	21,9	178,30	0,33	0,67	27,1	577,00	0,67	0,33
35	210	2,33	14,2	109,90	0,23	0,77	22,9	201,20	0,37	0,63	25,9	602,90	0,70	0,30
36	216	2,40	14,8	124,70	0,26	0,74	23,7	224,90	0,41	0,59	24,6	627,50	0,73	0,27
37	222	2,47	15,7	140,40	0,30	0,70	24,0	248,90	0,45	0,55	22,4	649,90	0,76	0,24
38	228	2,53	16,4	156,80	0,33	0,67	24,2	273,10	0,50	0,50	20,1	670,00	0,78	0,22
39	234	2,60	17,2	174,00	0,37	0,63	24,0	297,10	0,54	0,46	16,1	686,10	0,80	0,20
40	240	2,67	18,0	192,00	0,40	0,60	23,8	320,90	0,59	0,41	14,1	700,20	0,82	0,18

TABLA 36. Resultados Ensayo de Trazadores en la Unidad de Mezcla Rápida. Plantas uno y dos. Enero 18 de 1990

Número de orden	t (s)	t/T <sub>0</sub>	PUNTO 1				PUNTO 2				PUNTO 3			
			C-C <sub>0</sub> mg/lt	Σ(C-C <sub>0</sub> )	F(t)	1-F(t)	C-C <sub>0</sub> mg/lt	Σ(C-C <sub>0</sub> )	F(t)	1-F(t)	C-C <sub>0</sub> mg/lt	Σ(C-C <sub>0</sub> )	F(t)	1-F(t)
41	246	2,73	18,9	210,90	0,44	0,56	23,2	344,10	0,63	0,37	13,0	713,20	0,83	0,17
42	252	2,80	19,9	230,80	0,49	0,51	21,6	365,70	0,67	0,33	12,2	725,40	0,84	0,16
43	258	2,87	20,4	251,20	0,53	0,47	19,4	385,10	0,70	0,30	11,4	736,80	0,86	0,14
44	264	2,93	20,9	272,10	0,57	0,43	17,6	402,70	0,73	0,27	11,4	748,20	0,87	0,13
45	270	3,00	21,2	293,30	0,62	0,38	17,2	419,90	0,77	0,23	11,3	759,50	0,88	0,12
46	276	3,07	20,9	314,20	0,66	0,34	15,1	435,00	0,79	0,21	9,6	769,10	0,90	0,10
47	282	3,13	20,2	334,40	0,70	0,30	14,2	449,20	0,82	0,18	9,2	778,30	0,91	0,09
48	288	3,20	17,6	352,00	0,74	0,26	13,4	462,60	0,84	0,16	8,6	786,90	0,92	0,08
49	294	3,27	15,2	367,20	0,77	0,23	12,4	475,00	0,87	0,13	8,1	795,00	0,93	0,07
50	300	3,33	13,9	381,10	0,80	0,20	11,7	486,70	0,89	0,11	7,7	802,70	0,93	0,07
51	306	3,40	12,4	393,50	0,83	0,17	10,4	497,10	0,91	0,09	7,3	810,00	0,94	0,06
52	312	3,47	11,4	404,90	0,85	0,15	9,2	506,30	0,92	0,08	6,9	816,90	0,95	0,05
53	318	3,53	10,4	415,30	0,87	0,13	8,1	514,40	0,94	0,06	6,5	823,40	0,96	0,04
54	324	3,60	9,7	425,00	0,90	0,10	7,2	521,60	0,95	0,05	6,1	829,50	0,97	0,03
55	330	3,67	9,1	434,10	0,91	0,09	6,3	527,90	0,96	0,04	5,7	835,20	0,97	0,03
56	336	3,73	8,7	442,80	0,93	0,07	5,5	533,40	0,97	0,03	5,4	840,60	0,98	0,02
57	342	3,80	8,4	451,20	0,95	0,05	4,8	538,20	0,98	0,02	5,0	845,60	0,98	0,02
58	348	3,87	8,0	459,20	0,97	0,03	3,9	542,10	0,99	0,01	4,7	850,30	0,99	0,01
59	354	3,93	7,8	467,00	0,98	0,02	3,3	545,40	0,99	0,01	4,4	854,70	0,99	0,01
60	360	4,00	7,8	474,80	1,00	0,00	2,8	548,20	1,00	0,00	4,4	859,10	1,00	0,00

Análisis de la curva de concentración de trazador para el punto 1:

$$\phi = 0,8 \quad \tan \alpha = 0,473354 \quad T_0 = 90 \text{ s} \quad t_p = 270 \text{ s} \quad t_{10} = 170 \text{ s} \quad t_{50} = 236 \text{ s} \quad t_{90} = 315 \text{ s}$$

Tiempo en el que aparece el trazador en el efluente :  $t_1 = \phi T_0 = 0,8 \times 90 = 72 \text{ s}$

Tiempo en que C es mayor que  $C_{max} / 2$  :  $t_c = 128 \text{ s}$     Tiempo en que C es mayor que  $C_{max} / 10$  :  $t_b \gg 360 \text{ s}$

Índice de dispersión de Morrill:  $I_M = t_{90} / t_{10} = 315 / 170 = 1,85$  Flujo mezclado

$t_1 / T_0 = 72 / 90 = 0,80 > 0,30$  Predomina flujo a pistón y no existe tendencia a cortocircuito.

$t_m / T_0 = 236 / 90 = 2,62$  Presencia de espacios muertos negativos o errores durante el ensayo.

$t_p / T_0 = 270 / 90 = 3,00$  Predomina el flujo no ideal y presencia de zonas muertas.

$t_b / T_0 = 360 / 90 = 4,00$

Excentricidad de la curva:

$$e = \frac{(t_r - t_p) - (t_p - t_1)}{T_0} = \frac{(600 - 270) - (270 - 72)}{90} = 1,47$$

Conocidos estos parámetros, se determinan las funciones de flujo así:

$$p = \frac{\phi \tan \alpha}{0,434 + \phi \tan \alpha} = \frac{0,8 \times 0,473354}{0,434 + 0,8 \times 0,473354} = 0,47$$

$$\text{Zonas muertas: } m = 1 - \frac{\phi}{p} = 1 - \frac{0,80}{0,47} = -0,72$$

Fracción de flujo a pistón:  $p (1 - m) = 0,47 \times (1 + 0,72) = 0,81$

Fracción de flujo mezclado:  $(1 - p) (1 - m) = (1 - 0,47) (1 + 0,72) = 0,92$

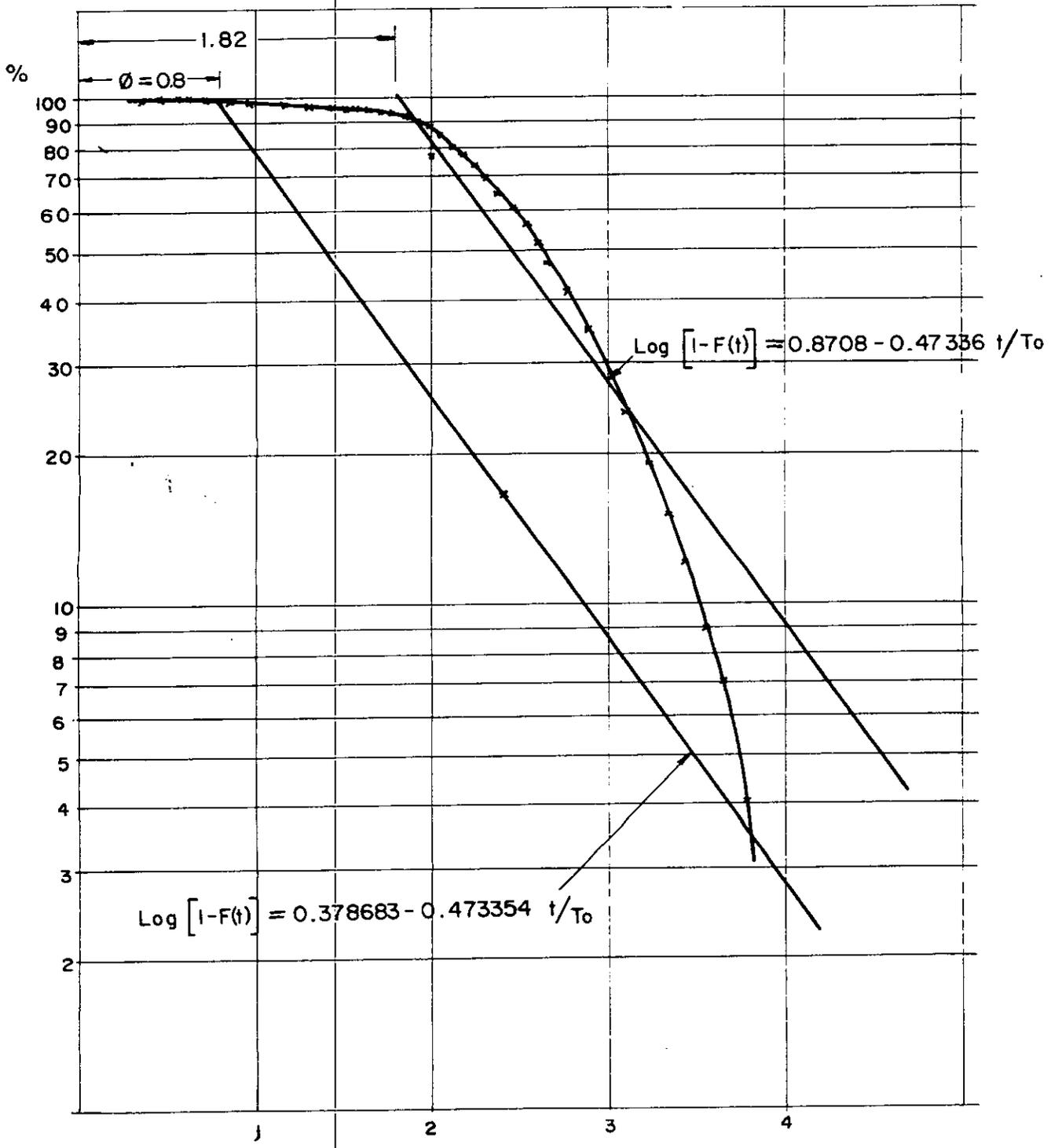
Concentración inicial de cloruros:

$$C_0 = \frac{Q \cdot \delta t \cdot \Sigma Cl}{(1 - p) (1 - m) V} = 33,6$$

Ecuación de la curva de la función  $1 - F(t)$  según el modelo simplificado de Wolf y Resnick :

$$C_t = C_0 e^{-0,0122 (t - 72,76)}$$

FIGURA 23. ENSAYO DE TRAZADORES  
UNIDAD DE MEZCLA RAPIDA  
PLANTAS 1 y 2  
PUNTO DE MUESTREO 1



ENERO 18/90

Análisis de la curva de concentración de trazador para el punto 2:

$$\phi = 1,2 \quad \tan \alpha = 0,570226 \quad T_0 = 90 \text{ s} \quad t_p = 228 \text{ s} \quad t_{10} = 147 \text{ s} \quad t_{50} = 216 \text{ s} \quad t_{90} = 293 \text{ s}$$

Tiempo en el que aparece el trazador en el efluente :  $t_1 = \phi T_0 = 1,2 \times 90 = 108 \text{ s}$

Tiempo en que C es mayor que  $C_{max} / 2$  :  $t_c = 118 \text{ s}$     Tiempo en que C es mayor que  $C_{max} / 10$  :  $t_b = 252 \text{ s}$

Indice de dispersión de Morrill:  $I_M = t_{90} / t_{10} = 293 / 147 = 1,99$

$t_1 / T_0 = 108 / 90 = 1,20 > 0,30$  Predomina flujo a pistón y no existe tendencia a cortocircuito

$t_m / T_0 = 216 / 90 = 2,40$

$t_p / T_0 = 270 / 90 = 2,53$  Predomina el flujo a pistón.

$t_b / T_0 = 252 / 90 = 2,80$

Excentricidad de la curva:

$$e = \frac{(t_r - t_p) - (t_p - t_1)}{T_0} = \frac{(380 - 270) - (270 - 108)}{90} = -0,578$$

Funciones de flujo :

$$p = \frac{\phi \tan \alpha}{0,434 + \phi \tan \alpha} = \frac{1,2 \times (0,570226)}{0,434 + 1,2 \times (0,570226)} = 0,61$$

Zonas muertas:  $m = 1 - \frac{\phi}{p} = 1 - \frac{1,20}{0,61} = -1,96$

Fracción de flujo a pistón:  $p (1 - m) = 0,61 \times (1 + 1,96) = 1,81$

Fracción de flujo mezclado:  $(1 - p) (1 - m) = (1 - 0,61) (1 + 1,96) = 1,15$

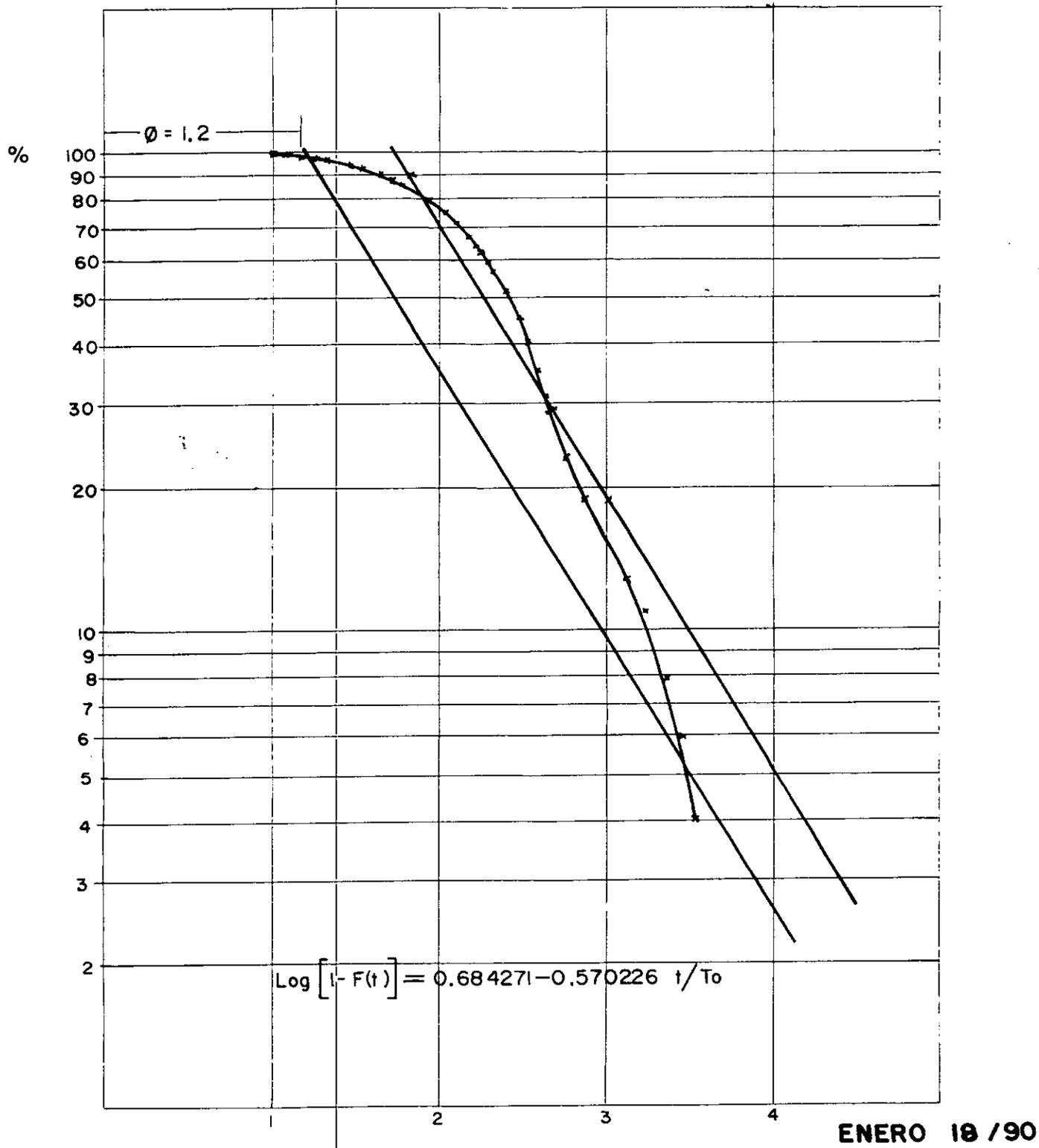
Concentración inicial de cloruros:

$$C_0 = \frac{Q \cdot \delta t \cdot \Sigma C_i}{(1 - p) (1 - m) V} = \frac{0,694 [6 \times 320 + 10 \times 126,73]}{(1 - 0,61) (1 + 1,96) 64,4} = 29,75$$

Ecuación de la curva de la función  $1 - F(t)$  según el modelo simplificado de Wolf y Resnick :

$$C_t = C_0 \epsilon^{-\frac{t}{(1-0,61)(1+1,96) 90} - 0,61(1+1,96)} = C_0 \epsilon^{-[t - 162,543]/138,6}$$

FIGURA 24. ENSAYO DE TRAZADORES  
UNIDAD DE MEZCLA RAPIDA  
PLANTAS 1 y 2  
PUNTO DE MUESTREO 2



Análisis de la curva de concentración de trazador para el punto 3:

$$\phi = 0,2 \quad \tan \alpha = 0,310970 \quad T_0 = 90 \text{ s} \quad t_p = 190 \text{ s} \quad t_{10} = 54 \text{ s} \quad t_{90} = 164 \text{ s} \quad t_{90} = 250 \text{ s}$$

Tiempo en el que aparece el trazador en el efluente :  $t_1 = \phi T_0 = 0,2 \times 90 = 18 \text{ s}$

Tiempo en que C es mayor que  $C_{max} / 2$  :  $t_c = 140 \text{ s}$     Tiempo en que C es mayor que  $C_{max} / 10$  :  $t_b = 360 \text{ s}$

Índice de dispersión de Morrill:  $I_M = t_{90} / t_{10} = 250 / 54 = 4,63$

$t_1 / T_0 = 18 / 90 = 0,20 < 0,30$  Predomina flujo mezclado y existe tendencia a cortocircuito

$t_m / T_0 = 164 / 90 = 1,82$

$t_p / T_0 = 190 / 90 = 2,11$

$t_b / T_0 = 360 / 90 = 4,00$

Excentricidad de la curva:

$$e = \frac{(t_c - t_p) - (t_p - t_1)}{T_0} = \frac{(380 - 190) - (190 - 18)}{90} = 0,20$$

Conocidos estos parámetros, se determinan las funciones de flujo así:

$$p = \frac{\phi \tan \alpha}{0,434 + \phi \tan \alpha} = \frac{0,2 \times 0,310970}{0,434 + 0,2 \times 0,310970} = 0,13$$

Zonas muertas:  $m = 1 - \frac{\phi}{p} = 1 - \frac{0,20}{0,13} = -0,54$

Fración de flujo a pistón:  $p (1 - m) = 0,13 \times (1 + 0,54) = 0,20$

Fración de flujo mezclado:  $(1 - p) (1 - m) = (1 - 0,13) (1 + 0,54) = 1,34$

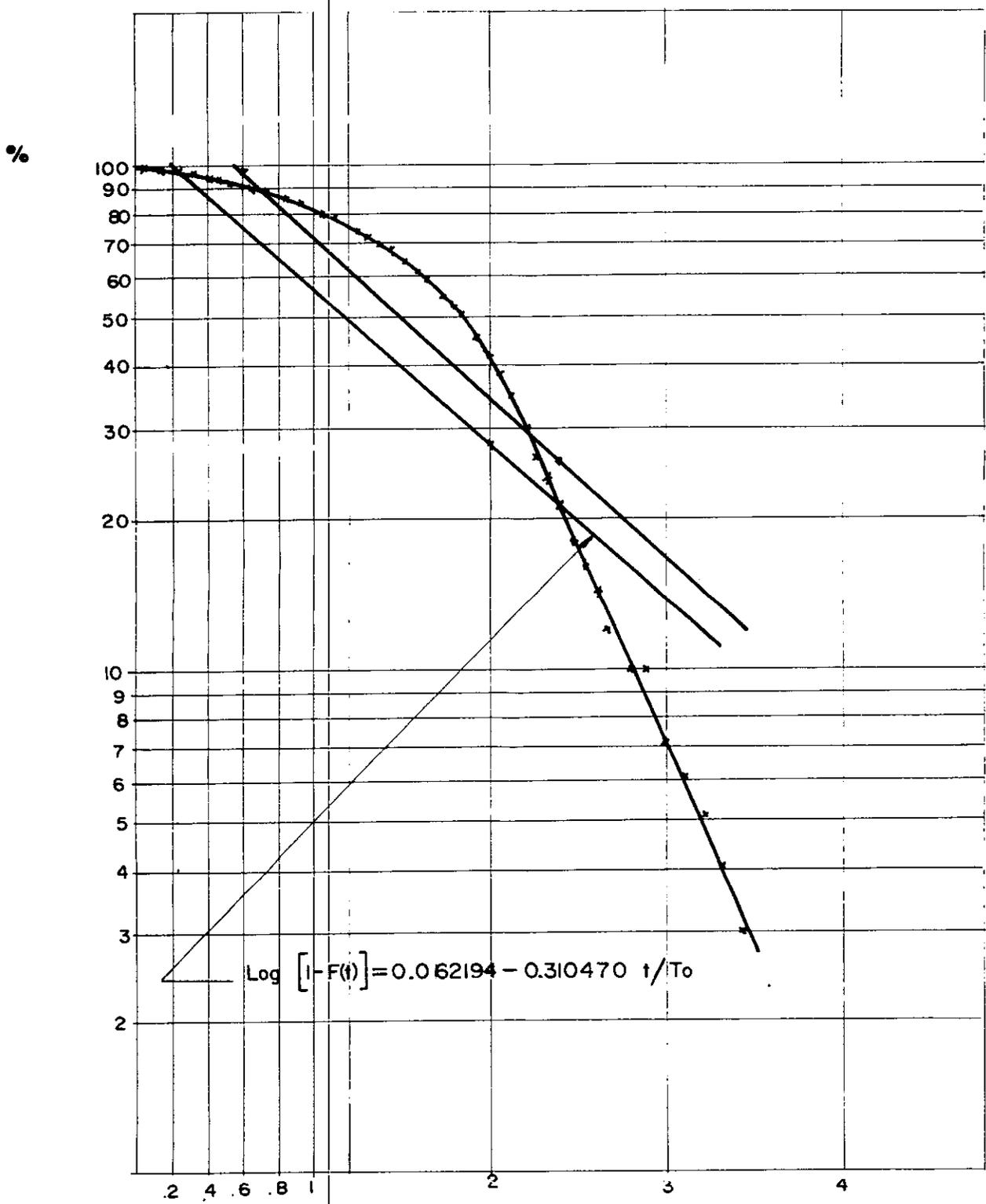
Concentración inicial de cloruros:

$$C_0 = \frac{Q \cdot \delta t \cdot \Sigma C_i}{(1 - p) (1 - m) V} = \frac{0,694 [6 \times 699,75 + 10 \times 94,4]}{(1 - 0,13) (1 + 0,54) 64,4} = 41,36$$

Ecuación de la curva de la función  $1 - F(t)$  según el modelo simplificado de Wolf y Resnick :

$$C_t = C_0 \epsilon \left[ \frac{1}{(1 - 0,13) (1 + 0,54)} e^{-\frac{t}{90}} - 0,13(1 + 0,54) e^{-\frac{t - 18}{120,6}} \right]$$

FIGURA 25. ENSAYO DE TRAZADORES  
UNIDAD DE MEZCLA RAPIDA  
PLANTAS 1 y 2  
PUNTO DE MUESTREO 3



ENERO 18/90

TABLA 37. Datos del ensayo de trazadores en la unidad de mezcla rápida. Enero 23 de 1990

Número de orden	t (s)	PUNTO 1		PUNTO 2		PUNTO 3	
		AgNO <sub>3</sub> Cloruros ml	mg/lt	AgNO <sub>3</sub> Cloruros ml	mg/lt	AgNO <sub>3</sub> Cloruros ml	mg/lt
1	10	3,1	22,0	3,5	24,8	3,2	22,7
2	20	3,3	23,4	3,4	24,1	3,2	22,7
3	30	3,0	21,3	3,3	23,4	3,4	24,1
4	40	3,1	22,0	3,3	23,4	3,3	23,4
5	50	3,1	22,0	3,1	22,0	3,3	23,4
6	60	3,2	22,7	3,3	23,4	3,2	22,7
7	70	3,9	27,7	3,1	22,0	3,2	22,7
8	80	3,2	22,7	3,5	24,8	3,2	22,7
9	90	3,1	22,0	3,8	26,9	3,1	22,0
10	100	3,0	21,3	4,2	29,8	3,3	23,4
11	110	3,1	22,0	4,8	34,0	3,7	26,2
12	120	3,4	24,1	4,8	34,0	3,7	26,2
13	130	3,7	26,2	4,8	34,0	4,0	28,4
14	140	3,9	27,7	4,9	34,8	4,4	31,2
15	150	4,2	29,8	5,1	36,2	4,7	33,3
16	160	4,6	32,6	5,4	38,3	4,9	34,8
17	170	4,8	34,0	5,4	38,3	4,9	34,8
18	180	5,0	35,5	5,7	40,4	5,1	36,2
19	190	5,0	35,5	5,5	39,0	5,0	35,5
20	200	5,4	38,3	5,9	41,8	5,6	39,7
21	210	5,3	37,6	6,0	42,6	5,9	41,8
22	220	5,7	40,4	6,1	43,3	6,3	44,7
23	230	5,6	39,7	6,0	42,6	6,3	44,7
24	240	5,7	40,4	5,4	38,3	6,4	45,4
25	250	6,0	42,6	4,9	34,8	6,2	44,0
26	260	5,8	41,1	4,7	33,3	5,9	41,8
27	270	5,7	40,4	4,8	34,0	5,3	37,6
28	280	5,0	35,5	4,7	33,3	5,3	37,6
29	290	4,9	34,8	4,4	31,2	4,7	33,3
30	300	4,7	33,3	4,0	28,4	4,6	32,6
31	310	4,5	31,9	4,0	28,4	4,4	31,2
32	320	4,2	29,8	3,7	26,2	4,2	29,8
33	330	3,9	27,7	3,6	25,5	4,0	28,4
34	340	4,0	28,4	3,6	25,5	4,1	29,1
35	350	3,9	27,7	3,6	25,5	3,9	27,7
36	360	3,8	26,9	3,5	24,8	3,8	26,9
37	370	3,7	26,2	3,4	24,1	3,6	25,5
38	380	3,6	25,5	3,4	24,1	3,7	26,2
39	390	3,5	24,8	3,4	24,1	3,5	24,8
40	400	3,4	24,1	3,4	24,1	3,5	24,8
41	410	3,4	24,1	3,3	23,4	3,4	24,1
42	420	3,5	24,8	3,2	22,7	3,1	22,0

FIGURA 26. ENSAYO DE TRAZADORES  
MEZCLA RAPIDA . PLANTAS 1 y 2  
PUNTO DE MUESTREO 1

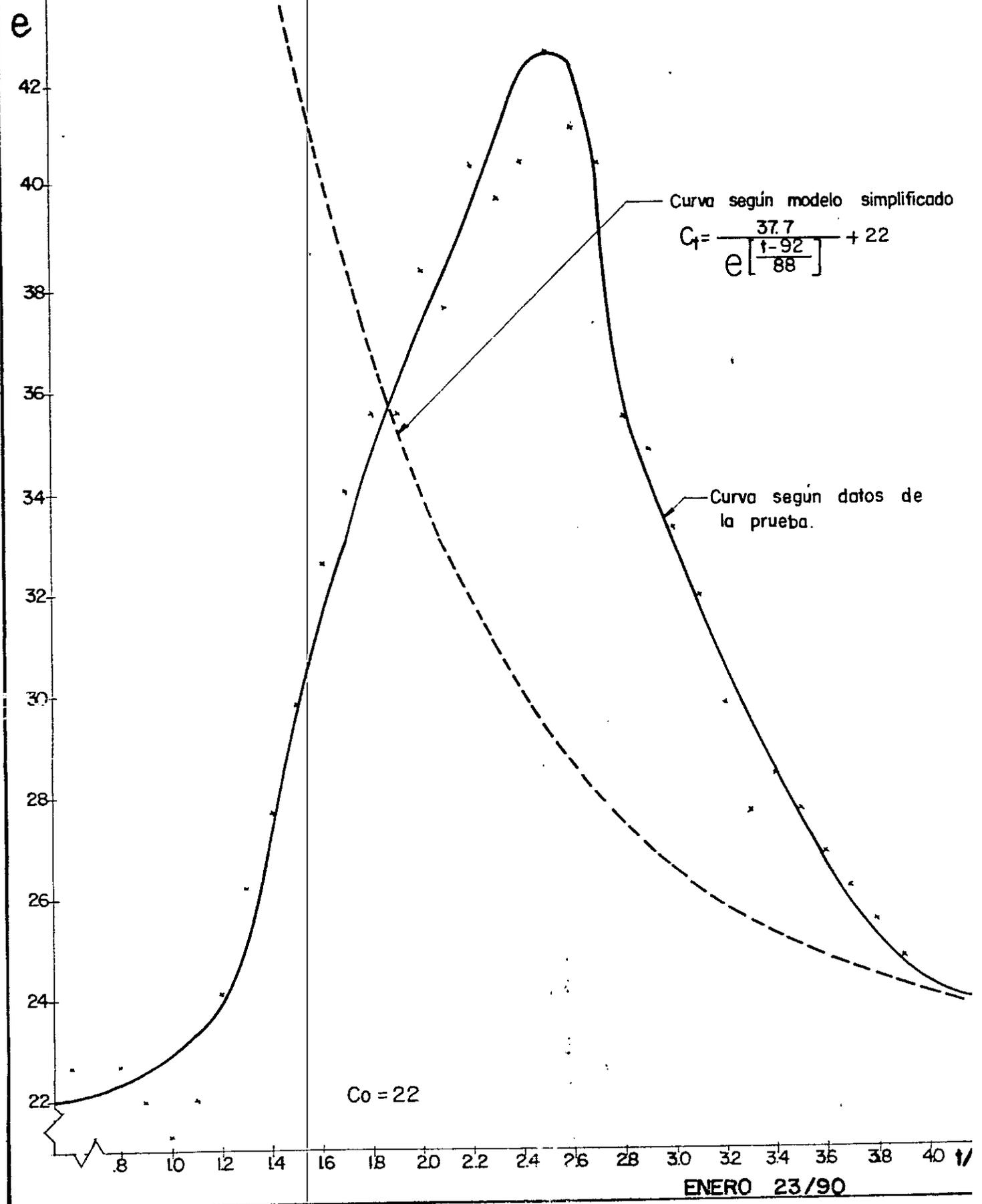
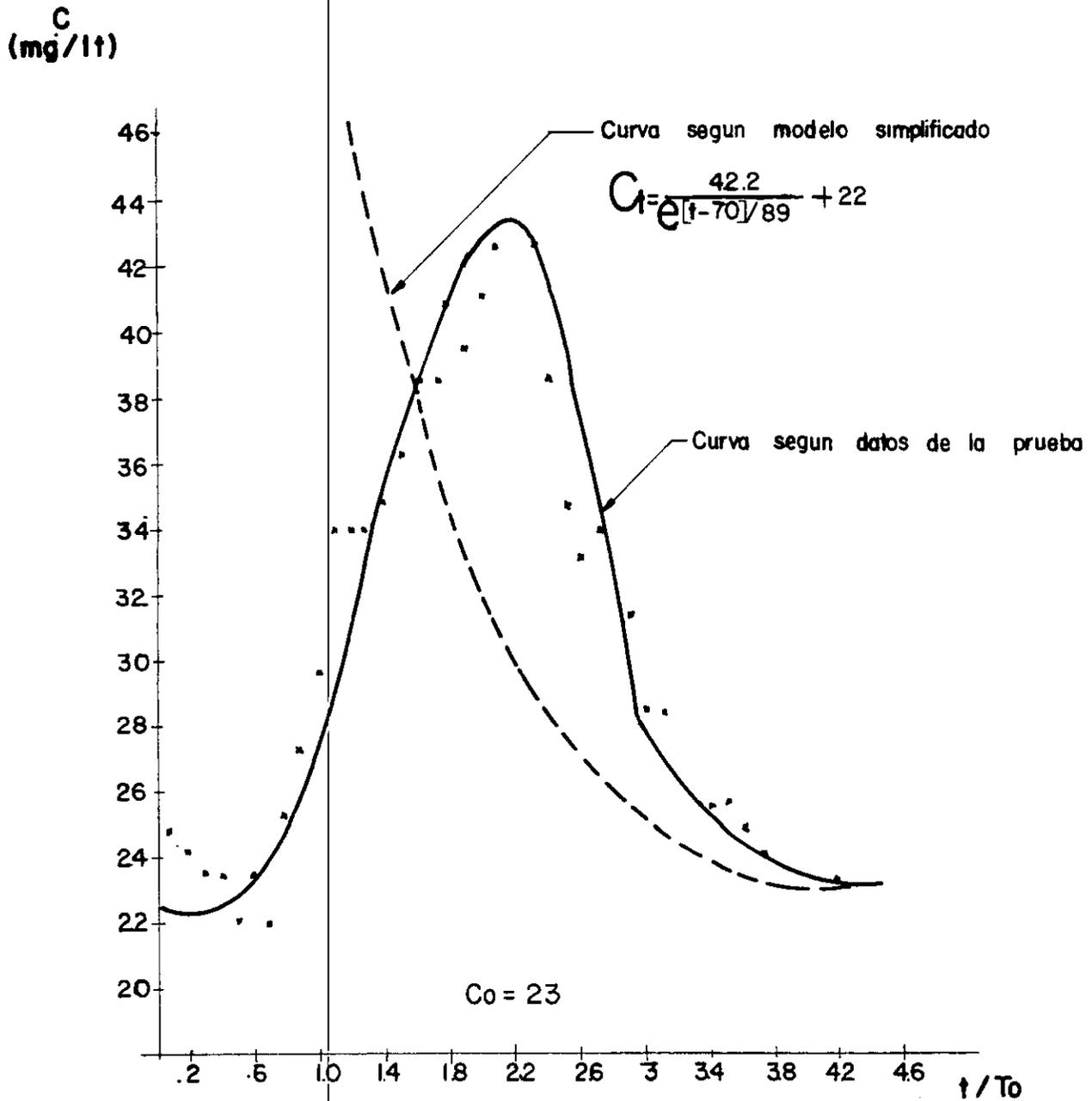
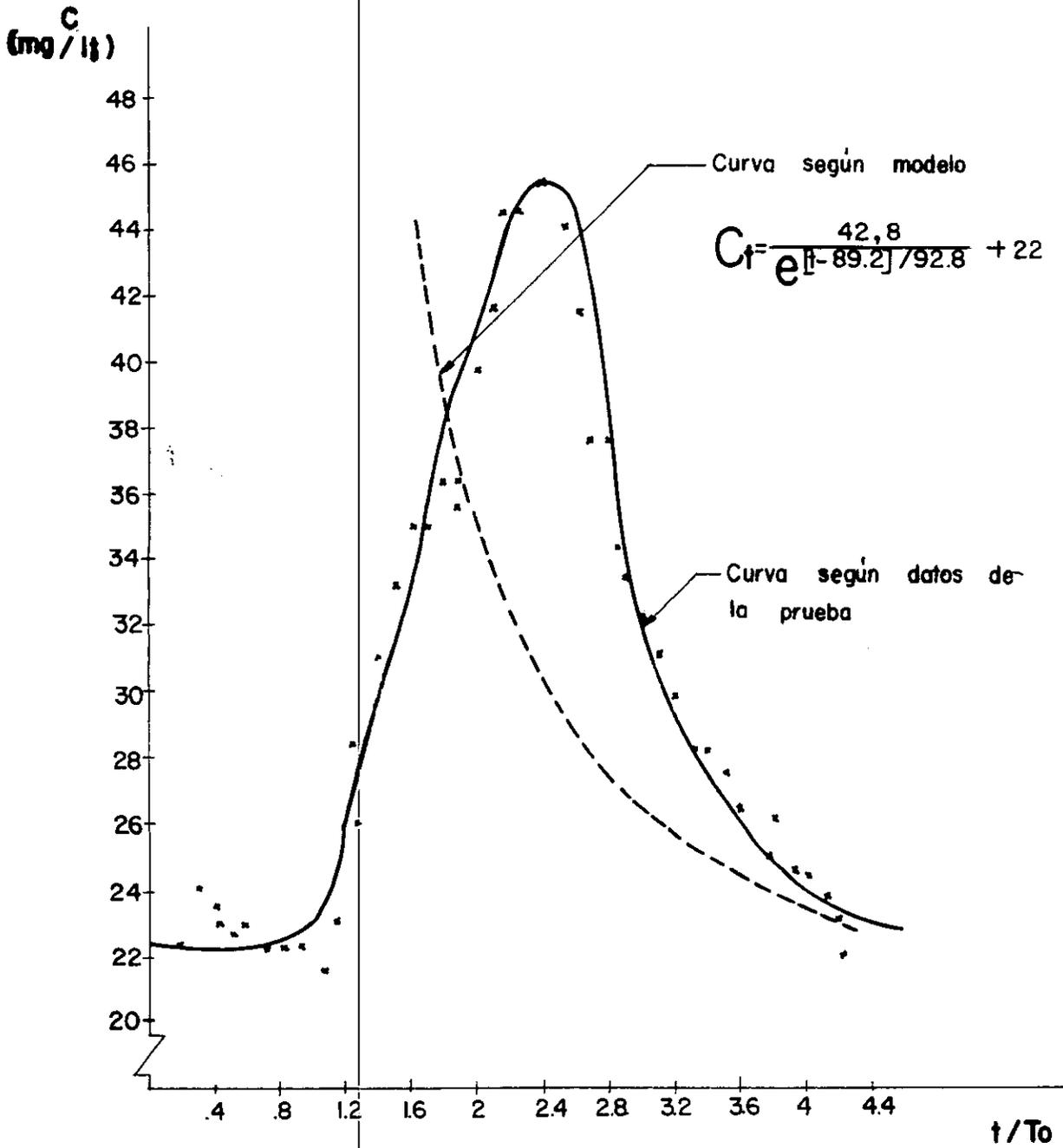


FIGURA 27. ENSAYO DE TRAZADORES  
 MEZCLA RAPIDA  
 PLANTAS 1 y 2  
 PUNTO DE MUESTREO 2



ENERO 23 / 90

FIGURA 28. ENSAYO DE TRAZADORES  
 MEZCLA RAPIDA  
 PLANTAS 1 y 2  
 PUNTO DE MUESTREO 3



ENERO 23 / 90

TABLA 38. Resultados Ensayo de Trazadores Unidad de Mezcla Rápida. Enero 23 de 1990. Plantas uno y dos.  
 $T_0 = 100$  segundos

Número de orden	t (s)	t/T <sub>0</sub>	PUNTO 1				PUNTO 2				PUNTO 3			
			C-C <sub>0</sub> mg/lit	Σ(C-C <sub>0</sub> )	F(t)	1-F(t)	C-C <sub>0</sub> mg/lit	Σ(C-C <sub>0</sub> )	F(t)	1-F(t)	C-C <sub>0</sub> mg/lit	Σ(C-C <sub>0</sub> )	F(t)	1-F(t)
1	10	0,1	0,00	0,00	0,00	1,00	0,40	0,40	0,00	1,00	0,70	0,70	0,00	1,00
2	20	0,2	0,00	0,00	0,00	1,00	0,45	0,85	0,00	1,00	0,70	1,40	0,00	1,00
3	30	0,3	0,00	0,00	0,00	1,00	0,55	1,40	0,00	1,00	0,70	2,10	0,01	0,99
4	40	0,4	0,00	0,00	0,00	1,00	0,65	2,05	0,01	0,99	0,75	2,85	0,01	0,99
5	50	0,5	0,00	0,00	0,00	1,00	0,90	2,95	0,01	0,99	0,80	3,65	0,01	0,99
6	60	0,6	0,10	0,10	0,00	1,00	1,25	4,20	0,01	0,99	0,80	4,45	0,01	0,99
7	70	0,7	0,20	0,30	0,00	1,00	1,70	5,90	0,02	0,98	0,90	5,35	0,01	0,99
8	80	0,8	0,35	0,65	0,00	1,00	2,60	8,50	0,02	0,98	1,10	6,45	0,02	0,98
9	90	0,9	0,60	1,25	0,00	1,00	4,10	12,60	0,04	0,96	1,40	7,85	0,02	0,98
10	100	1,0	0,95	2,20	0,01	0,99	6,00	18,60	0,05	0,95	2,40	10,25	0,03	0,97
11	110	1,1	1,30	3,50	0,01	0,99	8,00	26,60	0,08	0,92	4,05	14,30	0,04	0,96
12	120	1,2	1,80	5,30	0,02	0,98	10,10	36,70	0,11	0,89	5,50	19,80	0,05	0,95
13	130	1,3	3,00	8,30	0,03	0,97	12,10	48,80	0,14	0,86	7,10	26,90	0,07	0,93
14	140	1,4	5,00	13,30	0,04	0,96	13,60	62,40	0,18	0,82	9,00	35,90	0,10	0,90
15	150	1,5	7,40	20,70	0,07	0,93	15,00	77,40	0,22	0,78	11,00	46,90	0,13	0,87
16	160	1,6	8,35	29,05	0,09	0,91	16,30	93,70	0,27	0,73	12,55	59,45	0,16	0,84
17	170	1,7	11,15	40,20	0,13	0,87	17,60	111,30	0,32	0,68	14,40	73,85	0,20	0,80
18	180	1,8	12,65	52,85	0,17	0,83	18,80	130,10	0,37	0,63	16,10	89,95	0,24	0,76
19	190	1,9	14,00	66,85	0,22	0,78	19,80	149,90	0,43	0,57	17,60	107,55	0,29	0,71
20	200	2,0	15,25	82,10	0,27	0,73	20,50	170,40	0,49	0,51	19,00	126,55	0,34	0,66
21	210	2,1	16,40	98,50	0,32	0,68	21,10	191,50	0,55	0,45	20,80	147,35	0,40	0,60
22	220	2,2	17,55	116,05	0,38	0,62	21,40	212,90	0,61	0,39	22,30	169,65	0,46	0,54
23	230	2,3	19,00	135,05	0,44	0,56	20,70	233,60	0,67	0,33	23,15	192,80	0,52	0,48
24	240	2,4	20,20	155,25	0,50	0,50	19,20	252,80	0,73	0,27	23,40	216,20	0,59	0,41
25	250	2,5	20,60	175,85	0,57	0,43	17,00	269,80	0,77	0,23	23,00	239,20	0,65	0,35
26	260	2,6	20,15	196,00	0,64	0,36	14,30	284,10	0,82	0,18	21,60	260,80	0,71	0,29
27	270	2,7	17,70	213,70	0,69	0,31	12,00	296,10	0,85	0,15	18,00	278,80	0,76	0,24
28	280	2,8	13,85	227,55	0,74	0,26	9,90	306,00	0,88	0,12	15,60	294,40	0,80	0,20
29	290	2,9	12,10	239,65	0,78	0,22	7,60	313,60	0,90	0,10	12,90	307,30	0,83	0,17
30	300	3,0	10,80	250,45	0,81	0,19	5,60	319,20	0,92	0,08	10,60	317,90	0,86	0,14
31	310	3,1	9,70	260,15	0,84	0,16	4,50	323,70	0,93	0,07	8,85	326,75	0,89	0,11
32	320	3,2	8,40	268,55	0,87	0,13	3,90	327,60	0,94	0,06	7,20	333,95	0,91	0,09
33	330	3,3	7,30	275,85	0,89	0,11	3,50	331,10	0,95	0,05	6,10	340,05	0,92	0,08
34	340	3,4	6,30	282,15	0,92	0,08	3,10	334,20	0,96	0,04	5,30	345,35	0,94	0,06
35	350	3,5	5,40	287,55	0,93	0,07	2,70	336,90	0,97	0,03	4,70	350,05	0,95	0,05
36	360	3,6	4,60	292,15	0,95	0,05	2,40	339,30	0,97	0,03	4,20	354,25	0,96	0,04
37	370	3,7	3,90	296,05	0,96	0,04	2,10	341,40	0,98	0,02	3,70	357,95	0,97	0,03
38	380	3,8	3,25	299,30	0,97	0,03	1,80	343,20	0,98	0,02	3,20	361,15	0,98	0,02
39	390	3,9	2,70	302,00	0,98	0,02	1,60	344,80	0,99	0,01	2,70	363,85	0,99	0,01
40	400	4,0	2,25	304,25	0,99	0,01	1,40	346,20	0,99	0,01	2,20	366,05	0,99	0,01
41	410	4,1	2,00	306,25	0,99	0,01	1,20	347,40	1,00	0,00	1,60	367,65	1,00	0,00
42	420	4,2	2,00	308,25	1,00	0,00	1,10	348,50	1,00	0,00	1,10	368,75	1,00	0,00

Análisis de la curva de concentración de trazador para el punto 1:

$\phi = 0,92 \quad \tan \alpha = 0,484 \quad T_0 = 100 \text{ s} \quad t_p = 222 \text{ s} \quad t_{10} = 137 \text{ s} \quad t_{50} = 212 \text{ s} \quad t_{90} = 302 \text{ s}$

Tiempo en el que aparece el trazador en el efluente :  $t_1 = \phi T_0 = 0,92 \times 100 = 92 \text{ s}$

Tiempo en que C es mayor que  $C_{max} / 2$  :  $t_c = 140 \text{ s}$  Tiempo en que C es mayor que  $C_{max} / 10$  :  $t_b = 272 \text{ s}$

Indice de dispersión de Morrill:  $I_M = t_{90} / t_{10} = 302 / 137 = 2,20$

$t_1 / T_0 = 92 / 100 = 0,92 > 0,30$  Predomina flujo a pistón y no existe tendencia a cortocircuito.

$t_m / T_0 = 212 / 100 = 2,12$

$t_p / T_0 = 222 / 100 = 2,22$  Predomina el flujo a pistón.

$t_b / T_0 = 272 / 100 = 2,72$

Excentricidad de la curva:

$$e = \frac{(t_r - t_p) - (t_p - t_1)}{T_0} = \frac{(450 - 222) - (222 - 92)}{100} = 0,98$$

Funciones de flujo :

$$p = \frac{\phi \tan \alpha}{0,434 + \phi \tan \alpha} = \frac{0,92 \times 0,484}{0,434 + 0,92 \times 0,484} = 0,51$$

$$\text{Zonas muertas: } m = 1 - \frac{\phi}{p} = 1 - \frac{0,92}{0,51} = -0,80$$

Fración de flujo a pistón:  $p (1 - m) = 0,51 \times (1 + 0,80) = 0,92$

Fración de flujo mezclado:  $(1 - p) (1 - m) = (1 - 0,51) (1 + 0,80) = 0,88$

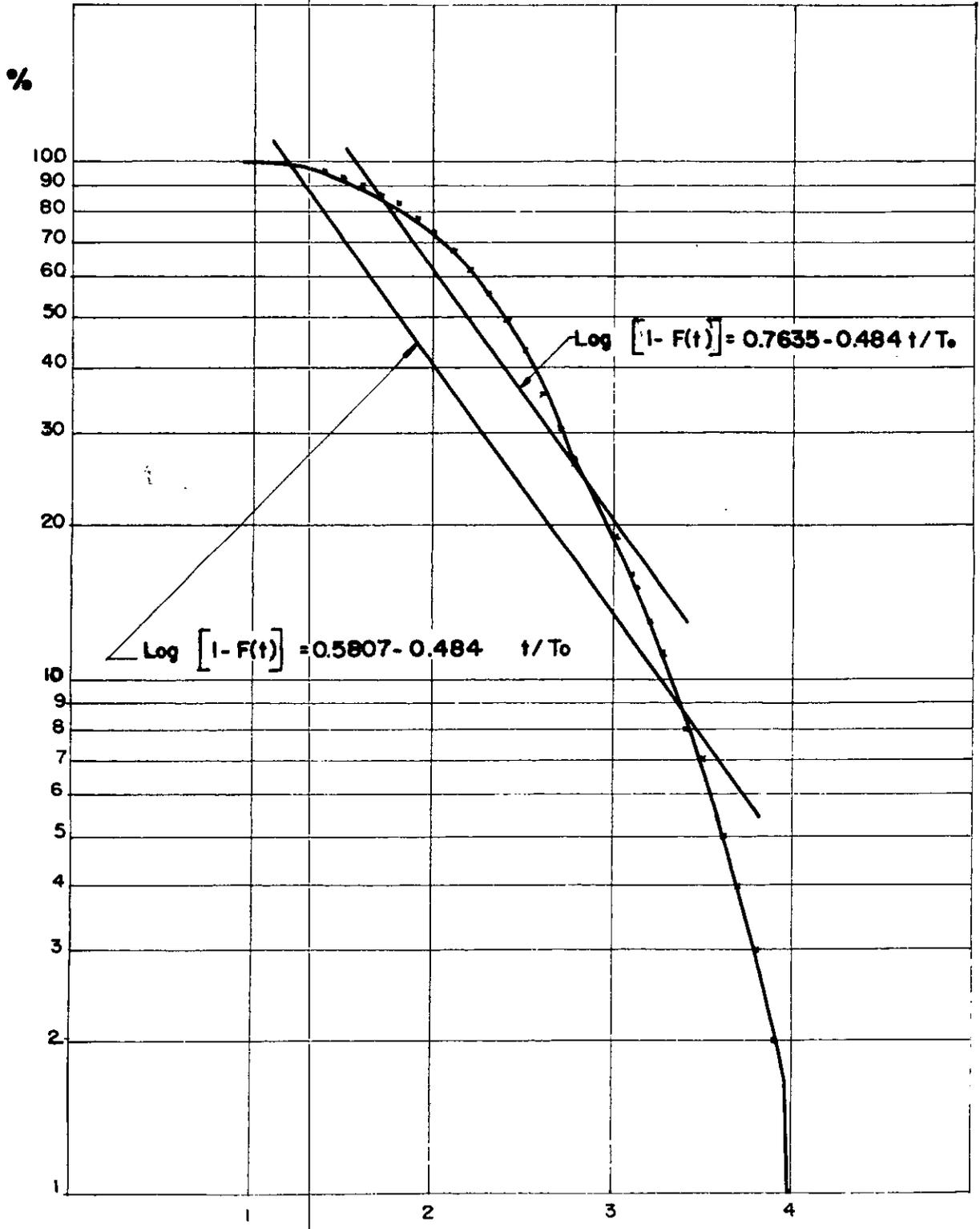
Concentración inicial de cloruros:

$$C_0 = \frac{Q \cdot \delta t \cdot \Sigma Cl}{(1 - p) (1 - m) V} = \frac{0,694 \times 10 \times 308,25}{(1 - 0,51) (1 + 0,80) 64,4} = 37,7$$

Ecuación de la curva de la función  $1 - F(t)$  según el modelo simplificado de Wolf y Resnick :

$$C_t = C_0 \left[ \frac{1}{(1 - 0,51)(1 + 0,80)} e^{-\frac{t}{100}} - 0,51(1 + 0,80) e^{-\frac{(t - 92)}{88}} \right] + 22 = C_0 \left[ \dots \right] + 22$$

FIGURA 29. ENSAYO DE TRAZADORES  
MEZCLA RAPIDA  
PLANTAS 1 y 2  
PUNTO DE MUESTREO 1



Análisis de la curva de concentración de trazador para el punto 2:

$$\phi = 0,7 \quad \tan \alpha = 0,4894 \quad T_0 = 100 \text{ s} \quad t_p = 200 \text{ s} \quad t_{10} = 95 \text{ s} \quad t_{90} = 180 \text{ s} \quad t_{99} = 270 \text{ s}$$

Tiempo en el que aparece el trazador en el efluente:  $t_1 = \phi T_0 = 0,7 \times 100 = 70 \text{ s}$

Tiempo en que C es mayor que  $C_{max} / 2$ :  $t_c = 160 \text{ s}$  Tiempo en que C es mayor que  $C_{max} / 10$ :  $t_b = 294 \text{ s}$

Índice de dispersión de Morrill:  $I_M = t_{90} / t_{10} = 270 / 95 = 2,84$

$t_1 / T_0 = 70 / 100 = 0,70 > 0,30$  Predomina flujo a pistón y no existe tendencia a cortocircuito

$$t_m / T_0 = 180 / 100 = 1,8$$

$t_p / T_0 = 200 / 100 = 2,0$  Predomina el flujo a pistón.

$t_b / T_0 = 294 / 100 = 2,94$  Por encima del valor correspondiente a mezcla completa.

Excentricidad de la curva:

$$e = \frac{(t_r - t_p) - (t_p - t_1)}{T_0} = \frac{(400 - 200) - (200 - 70)}{100} = 0,70$$

Conocidos estos parámetros, se determinan las funciones de flujo así:

$$p = \frac{\phi \tan \alpha}{0,434 + \phi \tan \alpha} = \frac{0,7 \times 0,4894}{0,434 + 0,7 \times 0,4894} = 0,44$$

$$\text{Zonas muertas: } m = 1 - \frac{\phi}{p} = 1 - \frac{0,70}{0,44} = -0,59$$

Fracción de flujo a pistón:  $p(1 - m) = 0,44 \times (1 + 0,59) = 0,70$

Fracción de flujo mezclado:  $(1 - p)(1 - m) = (1 - 0,44)(1 + 0,59) = 0,89$

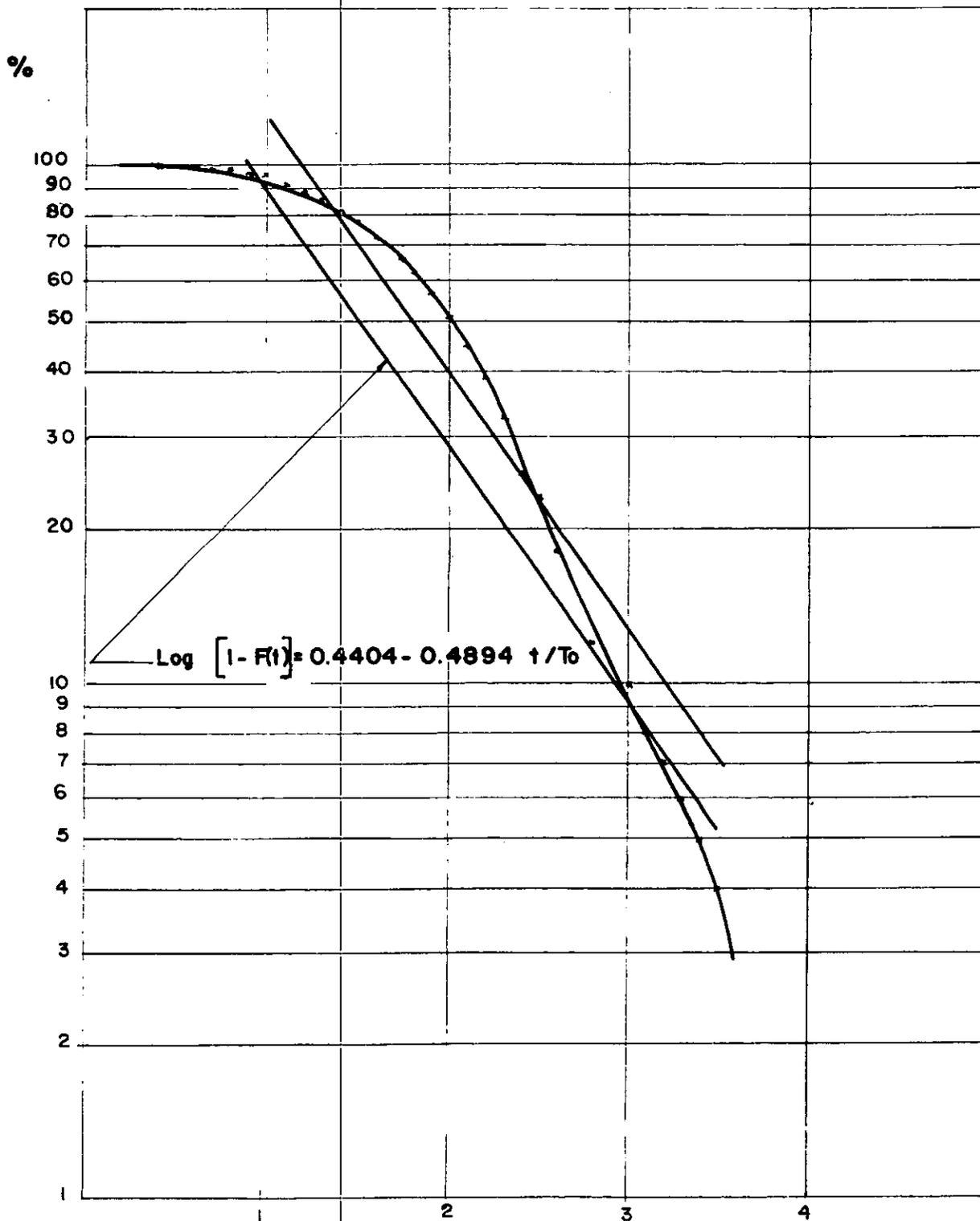
Concentración inicial de cloruros:

$$C_0 = \frac{Q \cdot \delta t \cdot \Sigma Cl}{(1 - p)(1 - m)V} = \frac{0,694 \times 10 \times 348,60}{(1 - 0,44)(1 + 0,59) 64,4} = 42,2$$

Ecuación de la curva de la función  $1 - F(t)$  según el modelo simplificado de Wolf y Resnick:

$$C_t = C_0 \left[ \frac{1}{(1 - 0,44)(1 + 0,59)} \left( \frac{t}{100} - 0,44(1 + 0,59) \right) \right] - (t - 70) / 89 + 22 = C_0 \left[ \frac{t}{100} - 0,44(1 + 0,59) \right] + 22$$

FIGURA 30. ENSAYO DE TRAZADORES  
MEZCLA RAPIDA  
PLANTAS 1 y 2  
PUNTO DE MUESTREO 2



Análisis de la curva de concentración de trazador para el punto 3:

$\phi = 0,89 \quad \tan \alpha = 0,4637 \quad T_0 = 100 \text{ s} \quad t_p = 230 \text{ s} \quad t_{10} = 129 \text{ s} \quad t_{90} = 216 \text{ s} \quad t_{95} = 300 \text{ s}$

Tiempo en el que aparece el trazador en el efluente :  $t_1 = \phi T_0 = 0,89 \times 100 = 89 \text{ s}$

Tiempo en que C es mayor que  $C_{max} / 2$  :  $t_c = 140 \text{ s}$  Tiempo en que C es mayor que  $C_{max} / 10$  :  $t_b = 304 \text{ s}$

Indice de dispersión de Morrill:  $I_M = t_{90} / t_{10} = 300 / 129 = 2,33$

$t_1 / T_0 = 89 / 100 = 0,89 > 0,30$  Predomina flujo a pistón y no existe tendencia a cortocircuito

$t_m / T_0 = 216 / 100 = 2,16$

$t_p / T_0 = 230 / 100 = 2,30$  Predomina el flujo a pistón.

$t_b / T_0 = 304 / 100 = 3,04$

Excentricidad de la curva:

$$e = \frac{(t_c - t_p) - (t_p - t_1)}{T_0} = \frac{(140 - 230) - (230 - 89)}{100} = 0,49$$

Funciones de flujo :

$$p = \frac{\phi \tan \alpha}{0,434 + \phi \tan \alpha} = \frac{0,89 \times 0,4637}{0,434 + 0,89 \times 0,4637} = 0,49$$

$$\text{Zonas muertas: } m = 1 - \frac{\phi}{p} = 1 - \frac{0,89}{0,49} = - 0,82$$

Fracción de flujo a pistón:  $p ( 1 - m ) = 0,49 \times ( 1 + 0,82 ) = 0,89$

Fracción de flujo mezclado:  $( 1 - p ) ( 1 - m ) = ( 1 - 0,49 ) ( 1 + 0,82 ) = 0,93$

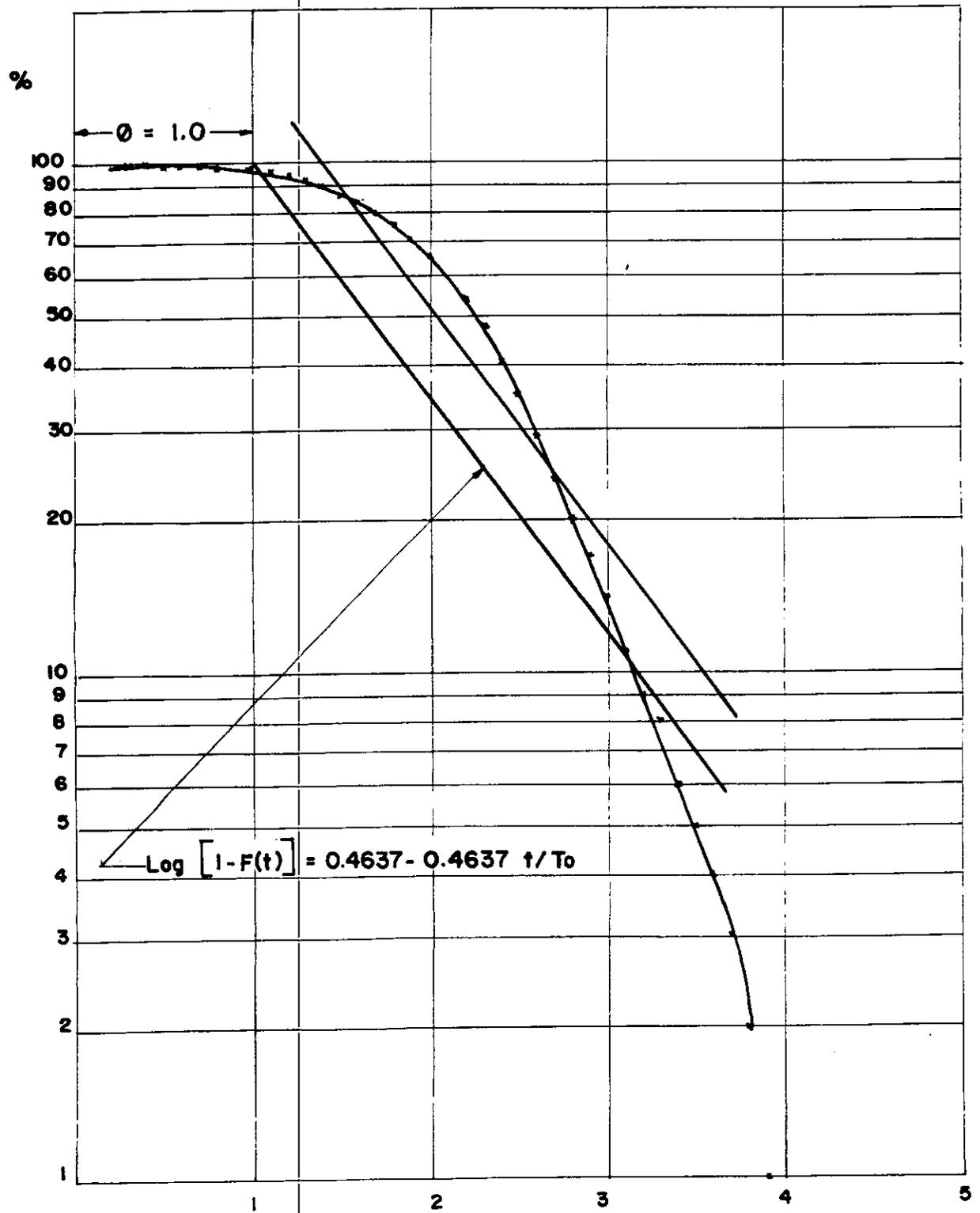
Concentración inicial de cloruros:

$$C_0 = \frac{Q \cdot \delta t \cdot \Sigma C_i}{( 1 - p ) ( 1 - m ) V} = \frac{0,694 \times 10 \times 368,75}{( 1 - 0,49 ) ( 1 + 0,82 ) 64,4} = 42,8$$

Ecuación de la curva de la función  $1 - F(t)$  según el modelo simplificado de Wolf y Resnick :

$$C_t = C_0 \cdot e^{-\frac{1}{(1-0,49)(1+0,82)} \left[ \frac{t}{100} - 0,49(1+0,82) \right]} - \left[ t - 89,21/92,8 \right] + 22 = C_0 \cdot e^{-\dots} + 22$$

FIGURA 31. ENSAYO DE TRAZADORES  
MEZCLA RAPIDA  
PLANTAS 1 y 2  
PUNTO DE MUESTREO 3



El tiempo real de detención en la unidad de mezcla rápida esta dada por los parámetros  $t_p$  encontrados para cada punto en el ensayo de trazadores.  $t_p$  es el tiempo en que se presenta la mayor concentración de la sustancia trazadora en las muestras testigo.

En las tres salidas de la mezcla rápida se encontraron estos valores:

$$t_{p1} = 222 \text{ s}, \quad t_{p2} = 200 \text{ s} \quad \text{y} \quad t_{p3} = 230 \text{ s}$$

$$\text{Valor promedio: } t_p = ( 652 / 3 ) = 217,3 \text{ s}$$

Este tiempo, 217 segundos, corresponde al periodo con que cuenta el coagulante para actuar sobre las partículas en suspensión. Este valor resulta mucho mayor que los 30 segundos que se determinaron como tiempo óptimo de mezcla rápida para la calidad de agua a tratar en la planta. Asi mismo resulta exageradamente amplio si consideramos que las reacciones de polimerización del coagulante se completan en menos de un segundo en la coagulación por adsorción-desestabilización y en menos de siete segundos en la coagulación por precipitado de los hidroxidos.

Del anterior ensayo de trazadores podemos también establecer la proporción de flujo que va a cada uno de los floculadores, tomando esta proporción igual a la que se dio en el reparto de la sustancia trazadora, como se indica en la Tabla 39.

**TABLA 39.** Distribución del flujo que sale de la cámara de mezcla rápida.

Punto de muestreo	$\Sigma(C - C_0)$	Proporción
1 (al floculador F <sub>1-2</sub> )	308,25	30,0 %
2 (al floculador F <sub>2-1</sub> )	348,60	34,0 %
3 (al floculador F <sub>1-1</sub> )	368,75	36,0 %
	<u>1.025,60</u>	<u>100,0 %</u>

5.1.4.3 Intensidad de la mezcla rápida. La unidad de mezcla rápida ya descrita utiliza la fuerza hidráulica que tiene el agua para producir la agitación de la misma. El agua entra por la parte central en el fondo del tanque. Se produce allí una ampliación brusca y cambio de sección del conducto del agua lo que origina una gran pérdida de carga.

Es esta pérdida de carga la que se desea cuantificar para calcular la intensidad de mezcla, pues la gradiente de velocidad tiene por fórmula general:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

donde

G = Gradiente velocidad en  $s^{-1}$

P = Potencia disipada por unidad de volumen

$\mu$  = Viscosidad

Y la potencia disipada en cualquier dispositivo de mezcla hidráulica es igual al producto de la pérdida de carga H por el caudal convertido en peso de líquido por unidad de tiempo.

$$P = H \Gamma Q$$

La pérdida de carga a considerar será la local debida al ensanchamiento brusco del tubo de sección circular con  $\phi = 0,61$  m a una sección cuadrada de 4,2 m x 4,2 m. Esta pérdida está dada por una de las siguientes ecuaciones:

$$H_1 = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$$

o

$$H_1 = \left[ \frac{A_2}{A_1} - 1 \right]^2 \frac{V_2^2}{2g}$$

donde  $V_1$  y  $V_2$  son las velocidades de flujo antes y después del ensanchamiento respectivamente. Al igual las áreas  $A_2$  y  $A_1$ .

Las velocidades son:

$$V_1 = \frac{Q}{A} = \frac{0,694 \text{ m}^3/\text{s} \times 4}{\pi \times (24 \times 0,0254 \text{ m})^2} = 2,378 \text{ m/s}$$

$$V_2 = \frac{Q}{A} = \frac{0,694 \text{ m}^3/\text{s}}{4,2 \text{ m} \times 4,2 \text{ m}} = 0,039 \text{ m/s}$$

y las pérdidas de carga correspondientes son:

$$H_1 = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2 \times g} = \frac{(2,378 - 0,039)^2}{(2) \times (9,8)} = 0,279 \text{ m/s}$$

6

$$H_1 = \left( \frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2 \times \frac{V_2^2}{2 \times g} =$$

$$= \left( \frac{4,2 \times 4,2 \times 4}{\pi [24 \times 0,0254]^2} - 1 \right)^2 \times \frac{(0,039)^2}{19,6} = 0,279$$

Potencia disipada:

$$P = H \Gamma Q = 0,279 \text{ m} \times 0,694 \text{ m}^3/\text{s} \times \Gamma = 0,194 \Gamma \text{ m}^4/\text{s}$$

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

$$G = \sqrt{\frac{0,194 \Gamma \text{ m}^4/\text{s}}{\mu (64,4) \text{ m}^3}} = \sqrt{\frac{1}{331,96}} \times \sqrt{\frac{\Gamma}{\mu}}$$

El factor  $(\Gamma/\mu)^*$  depende de la temperatura según la siguiente tabla:

TABLA 40. Valores de  $\sqrt{\Gamma/\mu}$  para distintas temperaturas.

TEMPERATURA, °C	$\sqrt{\Gamma / \mu}$
0	2.336,94
4	2.501,56
10	2.736,53
15	2.920,01
20	3.114,64
25	3.266,96

Tomando 25 °C como la temperatura promedio tendremos que:

$$G = 3.266,96 \times \sqrt{(1/331,96)} = 179 \text{ s}^{-1}$$

En general para 25 °C

$$G = 3.266,96 \times (H/T)^{0.5}, \quad \text{donde } T = V/Q$$

Al comparar el valor encontrado para la gradiente de agitación G notamos que esta muy por debajo de los rangos recomendados como óptimos y que se detallan en la Tabla 41

**TABLA 41.** Valores óptimos de Gradiente de velocidad.

Unidad de mezcla	Valores de G (s <sup>-1</sup> )
Retro-mezclador	500 - 1.000
Hidráulicos	1.000 - 2.000
Difusores	600 - 1.000
Mezcladores en línea	1.000 - 2.000

Así mismo difieren de las recomendación de la American Water Works Association (AWWA) que en la tercera edición (1971) de el manual "Water Treatment Plant Design " sugiere tiempos de mezcla comprendidos entre 10 y 30 segundos y gradientes de velocidad variables con el tiempo de agitación, pero no inferiores a 700 s<sup>-1</sup>, como sigue:

20 segundos	G = 1.000 s <sup>-1</sup>
30	900
40	790
> 40	700

El valor de  $G = 179 \text{ s}^{-1}$  encontrado en la planta no difiere mucho del simulado en el laboratorio. Al agitar la muestra de dos litros a 100 revoluciones por minuto y usando los deflectores discontinuos, se estaba imprimiendo una agitación equivalente a un gradiente de  $200 \text{ s}^{-1}$ .

En ese ensayo se obtuvo como tiempo óptimo de mezcla rápida el de 30 segundos, valor que esta siendo excedido por el tiempo teórico de retención,  $T_0 = 100 \text{ s}$ , y por el tiempo real de detención,  $t_p \approx 217 \text{ s}$ , encontrado en el ensayo con trazadores.

En definitiva la dupla de valores  $G$  y  $T$  no son los más indicados para obtener la mayor eficiencia de la unidad de mezcla rápida existente, produciendose un floc no pesado.

**5.1.4.4 Condiciones hidráulicas en obras de conexión de mezcla rápida y floculación.** Del ensayo de trazadores anteriormente descrito se tomaron los datos que permitieron establecer las condiciones hidráulicas que se dan en los tubos de 0,61 m de diámetro que interconectan la cámara de mezcla rápida con los floculadores.

Se determinó el gradiente de velocidad en cada uno de ellos a partir de la información obtenida en el ensayo de trazadores y aplicando la fórmula:

$$G = 3.266,96 \times (H/T)^{0,5}, \quad \text{donde } T = V/Q$$

La pérdida  $H$  se estimó para cada tramo de tubería considerando las pérdidas primarias en los tramos rectos según la fórmula de Darcy-Weisbach,  $H_p = \lambda \cdot (L \cdot V^2) / (2 \cdot g \cdot D)$  y para las pérdidas secundarias o locales se usó la expresión,  $H_s = \zeta \cdot V^2 / (2 \cdot g)$ .

**TABLA 42.** Gradientes de velocidad en tubos que conectan la mezcla rápida con los floculadores.

Tubo	Tiempo de retención	H (m)	G(s <sup>-1</sup> )
Al Fl <sub>1-2</sub>	2,10 segundos	0,022	334
Al Fl <sub>1-1</sub>	11,69 segundos	0,069	251
Al Fl <sub>2-1</sub>	6,19 segundos	0,055	308

Memoria de cálculo:

Caudales:

$$Q_{1-2} = 0,209 \text{ m}^3/\text{s} \quad Q_{1-1} = 0,250 \text{ m}^3/\text{s} \quad Q_{2-1} = 0,236 \text{ m}^3/\text{s}$$

Velocidades:

$$\phi = 0,61 \text{ m para los tres tubos;} \quad A = \pi \phi^2 / 4 = 0,292 \text{ m}^2$$

$$V_{1-2} = 0,715 \text{ m/s} \quad V_{1-1} = 0,855 \text{ m/s} \quad V_{2-1} = 0,808 \text{ m/s}$$

Longitud de cada conducto:

$$L_{1-2} = 1,5 \text{ m} \quad L_{1-1} = 10,0 \text{ m} \quad L_{2-1} = 5,0 \text{ m}$$

$$\text{Número de Reynolds : } Re = \phi V / \nu$$

$$\text{para } T = 30^\circ\text{C, } \nu = 0,804 \text{ centistokes} = 0,804 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Re_{1-2} = 542.475,1 \quad Re_{1-1} = 648.694, \quad Re_{2-1} = 613.034,$$

Por ser  $Re \gg 100.000$ , entonces  $\lambda$  es función solo de  $k/D$ , la rugosidad relativa.

La rugosidad absoluta para tuberías de fundición corriente, nuevas, es  $k = 0,25$  mm y para tuberías de fundición corriente oxidada, esta entre  $k = 1$  y  $k = 1,5$  mm. Tomamos  $k = 1,3$  mm y  $k/D = 0,0013/0,61 = 0,00213$ .

Usando el diagrama de Moody, encontramos los valores de  $f$ .

$$f_{1-2} = 0,025 \quad f_{1-1} = 0,024 \quad f_{2-1} = 0,024$$

Las pérdidas principales son :

$$H_{p1-2} = 0,001603 \text{ m} \quad H_{p1-1} = 0,01467 \text{ m} \quad H_{p2-1} = 0,00655 \text{ m}$$

Las pérdidas localizadas son :

$$H_{e1-2} = 0,020084 \text{ m} \quad H_{e1-1} = 0,05408 \text{ m} \quad H_{e2-1} = 0,04830 \text{ m}$$

Pérdidas totales en cada tubo :

$$H_{1-2} = 0,022 \text{ m} \quad H_{1-1} = 0,069 \text{ m} \quad H_{2-1} = 0,055 \text{ m}$$

Tiempos de retención :  $T = L \times A / Q$

$$T_{1-2} = 2,10 \text{ s} \quad T_{1-1} = 11,69 \text{ s} \quad T_{2-1} = 6,19 \text{ s}$$

Gradientes de velocidad:  $G = 3.266,96 (H/T)^*$

$$G_{1-2} = 334,3 \text{ s}^{-1} \quad G_{1-1} = 251,7 \text{ s}^{-1} \quad G_{2-1} = 308,0 \text{ s}^{-1}$$

Al comparar estos resultados de la gradiente de velocidad  $G$  con los obtenidos en el numeral 5.1.4.3, puede observarse que en estos conductos se dan condiciones más favorables para el proceso de coagulación que en la misma cámara de mezcla rápida: Se obtienen gradientes mucho más altos, aunque no los ideales, y el tiempo de retención es mínimo, además del predominio del flujo a pistón.

Estos mayores gradientes rompen el floc débil que logre formarse en la unidad de mezcla rápida.

Es factible que se obtenga una mayor eficiencia si se hace que el tubo que lleva la solución de sulfato de aluminio a dosificar, vierta directamente sobre la cámara de mezcla rápida.

## 5.2 EVALUACION DEL PROCESO DE FLOCULACION

La floculación es el proceso que sigue a la desestabilización de las partículas coloidales.

Consiste en el transporte dentro del líquido de esas partículas desestabilizadoras favoreciendo el contacto entre unas y otras para que se aglutinen en partículas mayores que puedan ser removidas por sedimentación.

La floculación puede ser pericinéctica u ortocinéctica. Será pericinéctica si la causa principal de las colisiones necesarias es el movimiento browniano y ortocinéctica si son debidas a la agitación del líquido.

Las variables de control más importantes del proceso de floculación son: la concentración de coagulante (C); la intensidad de agitación con que es mezclada la suspensión en el floculador, expresada por el gradiente de velocidad (G); el tiempo de retención, y el número de compartimentos del floculador.

Estas variables están involucradas en las distintas teorías desarrolladas por investigadores como Smolowchowski, Stein, Camp, Hudson, Fair, Harris, Argaman y Kaufman.

Dos conclusiones importantes del trabajo realizado por Argaman y Kaufman, son:

1a Existe un período de tiempo antes del cual no hay floculación, cualquiera que sea la intensidad de agitación.

2a. Para un mismo grado de tratamiento del agua se reduce significativamente el tiempo total de retención mediante la compartimentalización.

Al tratar de determinar estas variables en las plantas evaluadas, encontramos que de los tres floculadores existentes sólo uno de ellos está funcionando como floculador hidráulico que es. Los otros dos fueron por varios años del tipo de agitación mecánica. Al quedar obsoletos estos equipos se retiraron parcialmente y se pusieron a trabajar los floculadores como si fuesen hidráulicos pero no se les modificó para esto. Así tenemos que las condiciones de floculación son muy distintas en cada uno de ellos.

Los ensayos realizados para la evaluación fueron los siguientes:

- a. Determinación del tiempo óptimo de mezcla lenta.
- b. Gradientes de velocidad con los que operan los floculadores.
- c. Tamaño del flóculo producido y tiempo de aparición del mismo.
- d. Eficiencia comparativa del proceso.
- e. Caudal real de trabajo de los floculadores.
- f. Periodo de retención y características hidráulicas de los floculadores.

5.2.1 **Tiempo óptimo de mezcla lenta.** El objetivo de este ensayo es determinar los parámetros de floculación: Gradiente de velocidad  $G$  y tiempo de retención  $T$ . El establecer el tiempo de floculación y la intensidad de agitación para una mayor remoción de turbiedad implicó hacer una serie de pruebas de jarras. Una prueba para cada valor de  $G$  y un tiempo diferente de mezcla lenta para cada vaso dentro de la prueba.

Los datos y resultados de ensayo son los mostrados en las Tablas 43 y 44.

**TABLA 43.** Datos iniciales del ensayo de jarras para determinar tiempo óptimo de mezcla lenta.

Dosis: 55 ppm

$T_o = 22$  U.N.T

$C_o = 33$  U.C.

$pH_o = 7,0$

M.R. = 30 s a 100 rpm

M.L. = variables G y T

SED = 10 min.

**TABLA 44.** Resultados del ensayo de jarras para determinar tiempo óptimo de mezcla lenta.

JARRA		1		2		3	
M.L. (min)		5		10		15	
G	W	$T_f$	$T_f/T_o$	$T_f$	$T_f/T_o$	$T_f$	$T_f/T_o$
10	16	8,4	38,2	3,9	17,7	2,6	11,8
20	25	7,6	34,5	6,3	28,6	2,1	9,5
30	34	6,9	31,4	3,2	14,5	2,4	10,9
40	41	4,9	22,3	3,0	13,6	5,4	24,5
50	50	6,4	29,1	6,8	30,9	4,8	21,8
70	61	6,7	30,5	7,0	31,8	7,2	32,7
90	72	14,0	63,6	13,0	59,1	14,0	63,6

JARRA		4		5		6	
M.L. (min)		20		25		30	
G	W	$T_f$	$T_f/T_0$	$T_f$	$T_f/T_0$	$T_f$	$T_f/T_0$
10	16	2,0	9,1	1,8	8,2	2,0	9,1
20	25	3,5	15,9	2,9	13,2	3,0	13,6
30	34	2,9	13,2	4,2	19,1	3,4	15,5
40	41	3,9	17,7	4,1	18,6	2,0	9,1
50	50	6,6	30,0	7,4	33,6	6,6	30,0
70	61	8,4	38,2	9,6	43,6	6,0	27,3
90	72	18,0	81,8	14,0	63,6	10,0	45,5

Se grafican en escala natural los valores de  $T_f/T_0 \times 100$  versus períodos de floculación para los diversos valores de gradiente de velocidad. Figura 32.

En esta curva se encontró que el período total de floculación en el cual se produce la máxima eficiencia es de 25 minutos para un gradiente de velocidad de  $10 \text{ s}^{-1}$ . Por ser esta una intensidad de agitación relativamente baja y dado que el período de 15 min. aparece como el óptimo con gradientes de 20, 30 y  $50 \text{ s}^{-1}$ , adoptamos 15 min como el período de floculación. En la curva se observa también que para cada gradiente de velocidad existe un tiempo óptimo de floculación que produce la máxima eficiencia. Estos puntos tienen las siguientes coordenadas:

FIGURA 32. TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION.

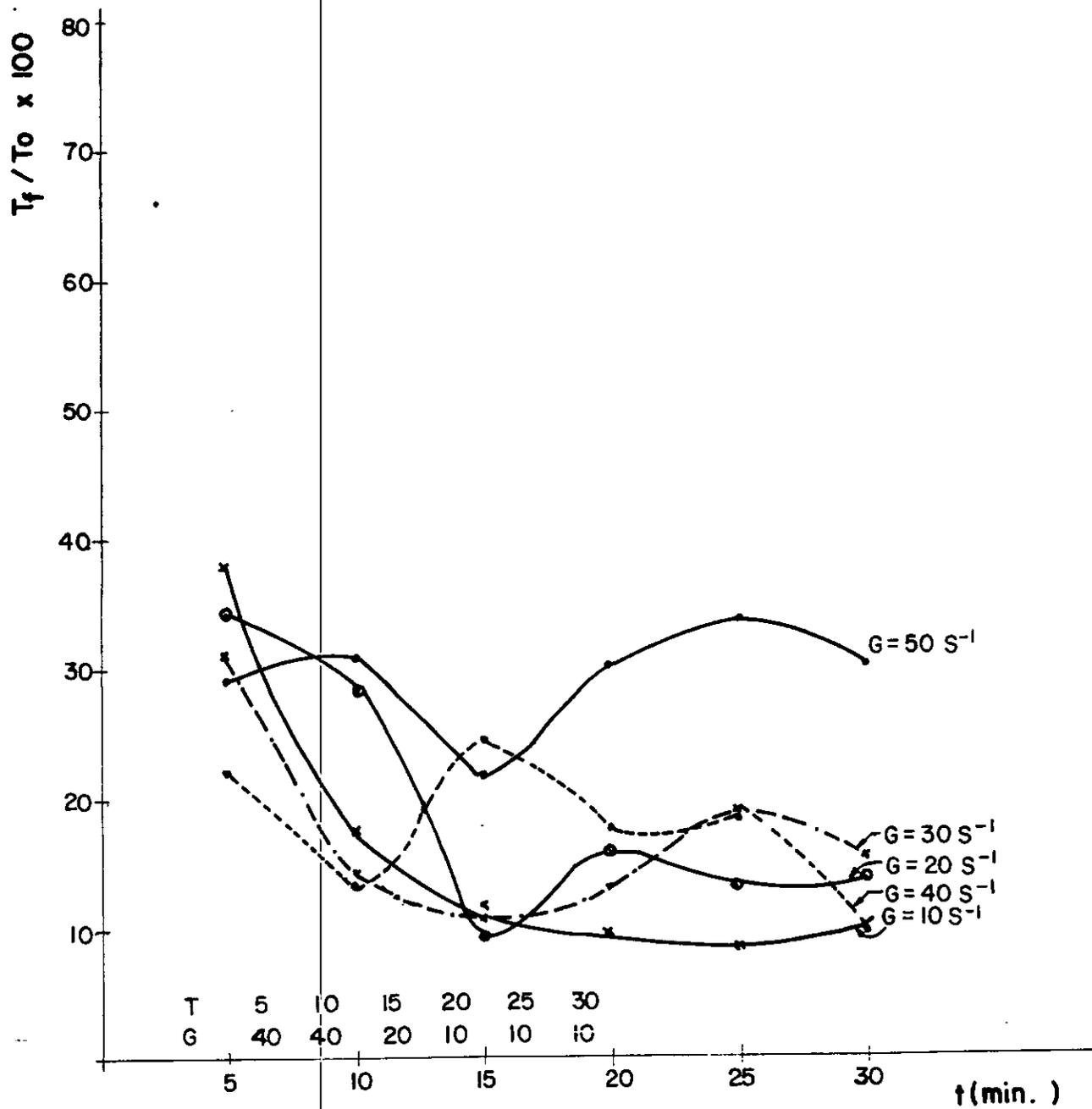


FIGURA 32. TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION.

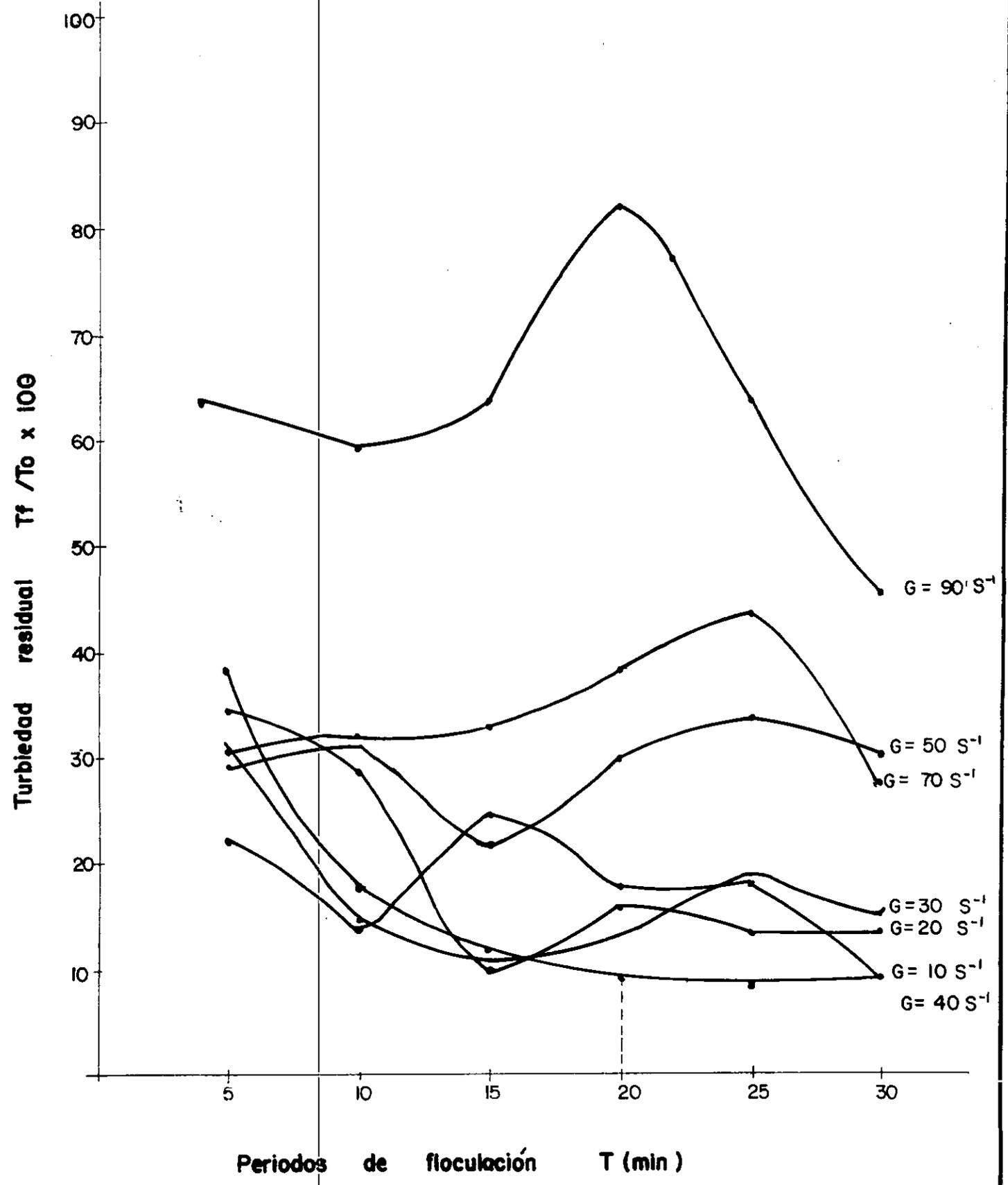


TABLA 45. Puntos de la recta T vs G.

Punto	1	2	3	4	5	6	7
T minuto	25	15	15	30	15	30	30
G s <sup>-1</sup>	10	20	30	40	50	70	90

Graficando en escala aritmética los valores de  $T_f/T_0 \times 100$  versus los gradientes de velocidad para los diferentes períodos de floculación, se obtuvieron siete curvas en las cuales se observa que para cada periodo de floculación existe una gradiente de velocidad que produce la máxima eficiencia, es decir el menor valor de  $(T_f/T_0) \times 100$ .  
Figura 33.

Estos puntos tienen las siguientes coordenadas:

TABLA 46. Gradientes que producen la mayor eficiencia para distintos tiempos de floculación.

Puntos	1	2	3	4	5	6
T minutos	5	10	15	20	25	30
G (s <sup>-1</sup> )	40	40	20	10	10	10 y 40

Graficamos estos puntos sobre papel log-log y trazamos la recta de mejor ajuste a dichos puntos (Figura 34). La ecuación de la recta la obtenemos aplicando el ajuste por mínimos cuadrados y será de la forma

$$Y = a + b X$$

FIGURA 33. GRADIENTE OPTIMO DE FLOCULACION

$T_f / T_0 \times 100$

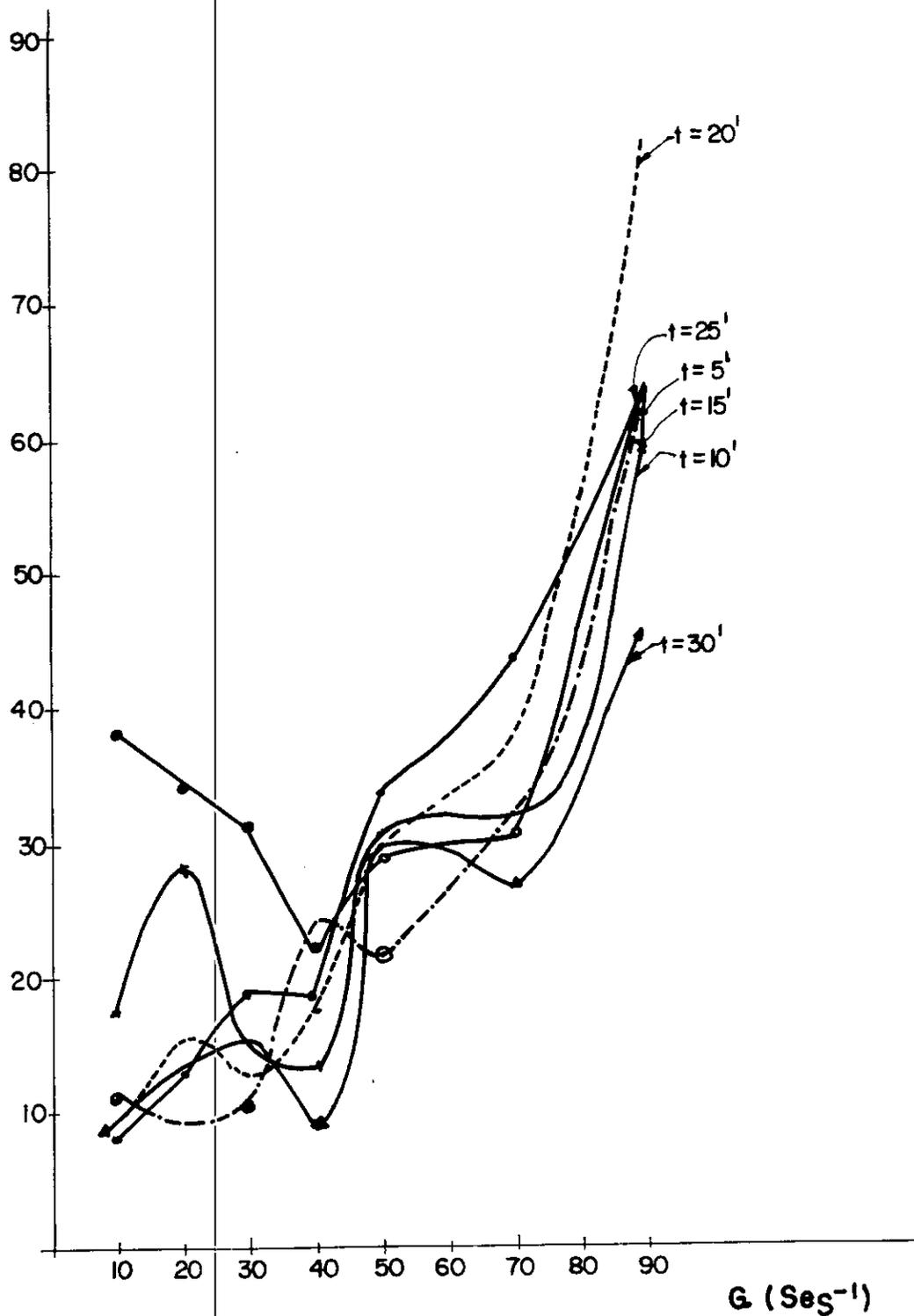


FIGURA 33. GRADIENTES OPTIMOS DE FLOCULACION

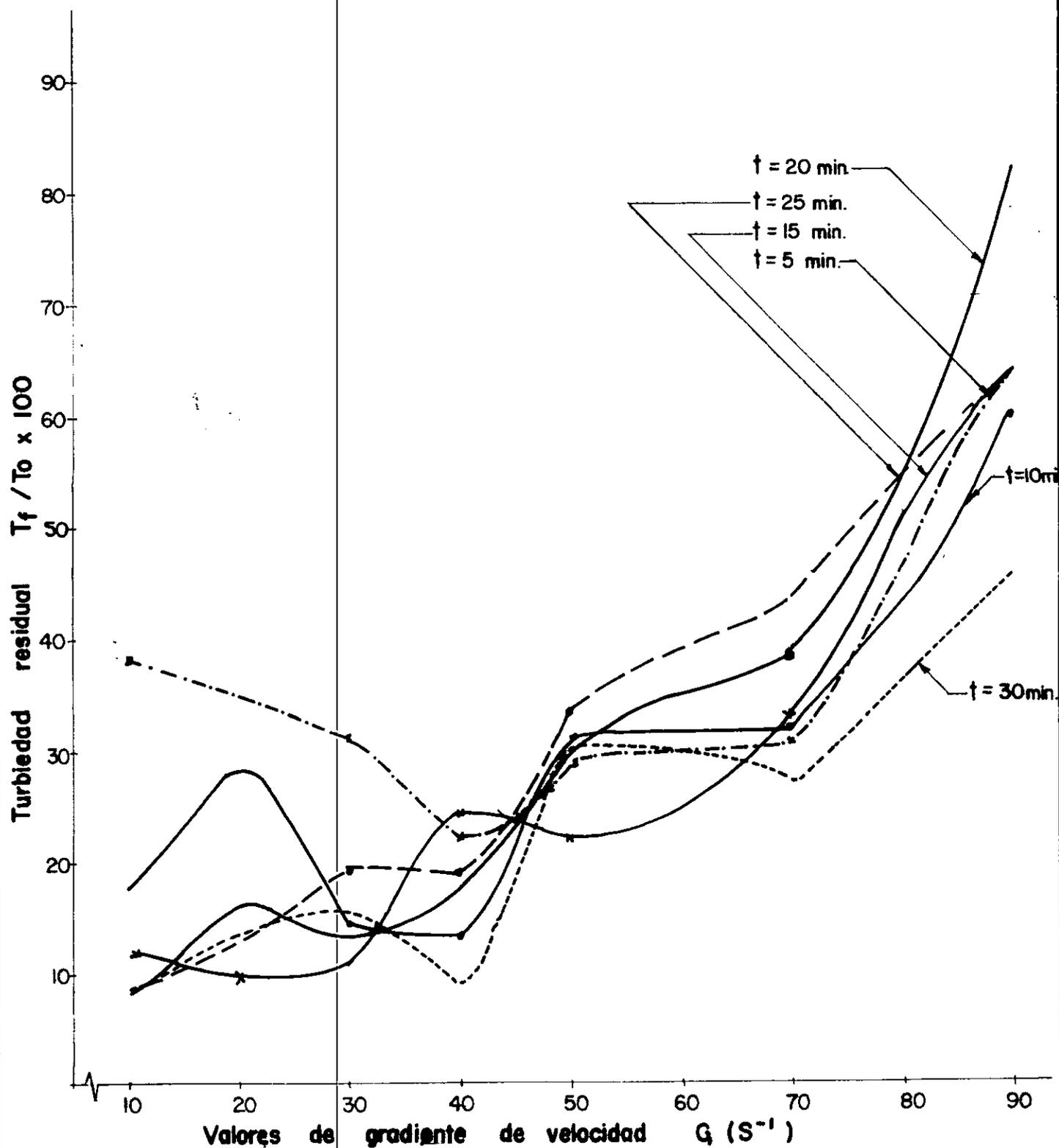
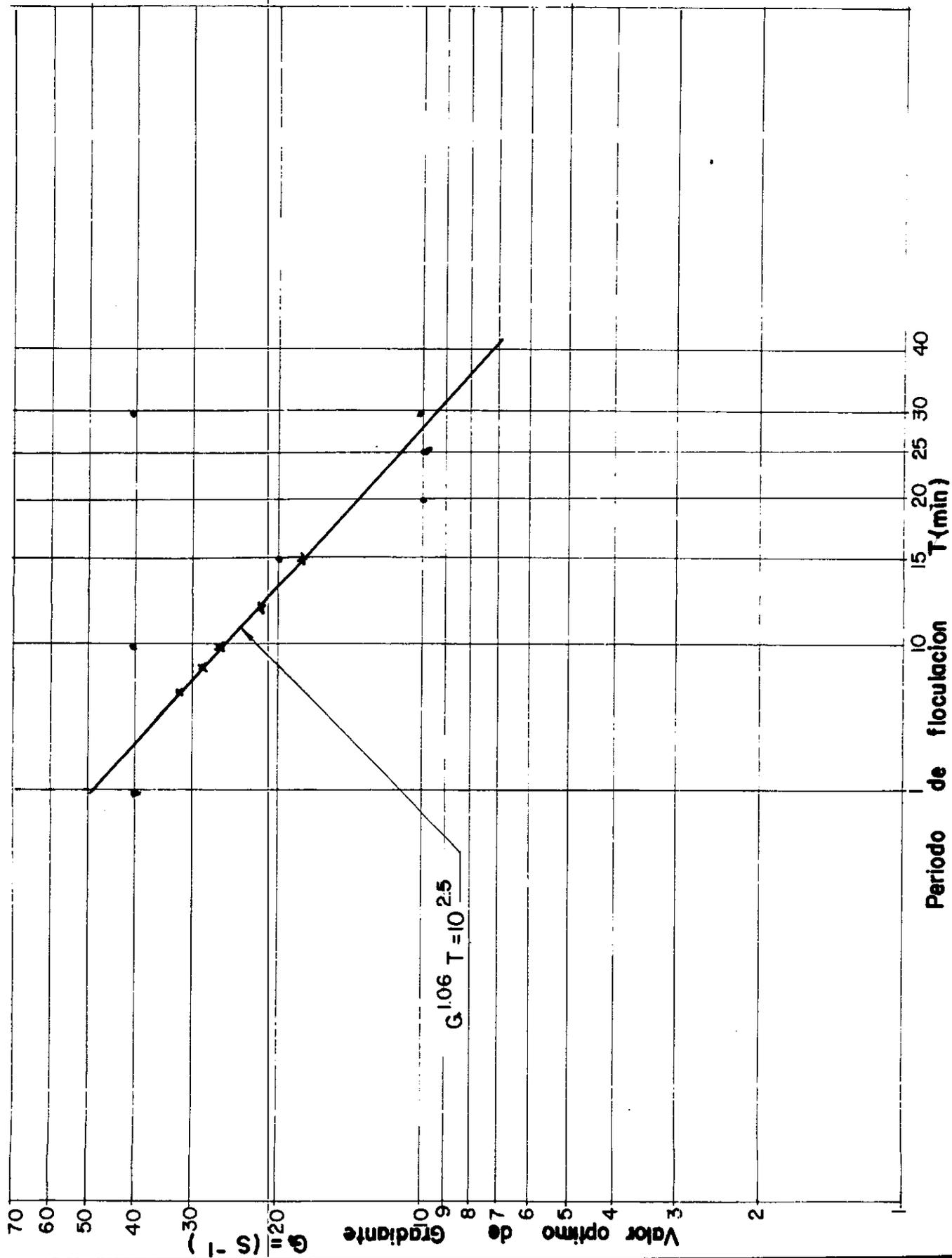


FIGURA 34. GRADIENTE OPTIMO PARA DISTINTOS TIEMPOS DE FLOCULACION.



en la cual

$$Y = \log G \quad \text{y} \quad X = \log T$$

Encontramos que  $a = 2,36$

$$b = -0,95$$

$$r = 0,92$$

La ecuación final es entonces,

$$\text{Log } G = 2,363 - 0,946 \text{ Log } T$$

Reagrupando y encontrando los antilogaritmos resulta que:

$$G^{1.08} \times T = 102.5$$

Esta expresión muestra la interrelación que existe entre la calidad del agua a tratar y las variables G y T que deben aplicarse para lograr una mayor eficiencia del proceso de floculación.

Si se tiene floculadores con tres compartimentos o zonas de distinto gradiente de velocidad, decreciendo a partir del primero, al aplicar la ecuación arriba encontrada, obtenemos los gradientes apropiados para cada compartimento según el periodo de retención de diseño para cada zona. En la Tabla 47 se muestra un ejemplo de aplicación de esta expresión.

**TABLA 47.** Gradientes de velocidad en un floculador adecuado para la calidad del agua a tratar.

Compartimento	Período de retención		Gradiente de velocidad $s^{-1}$
	Parcial (min)	Total (min)	
1	5	5	50
2	5	10	26
3	5	15	18
1	4	4	60
2	5	9	28
3	6	15	18

### 5.2.2 Gradientes de operación actual de los floculadores.

A nivel de las plantas de tratamiento se dividió cada floculador en tres secciones y se determinó:

- El caudal de la unidad.
- El volumen de cada tramo.
- La pérdida de carga en cada tramo nivelando la superficie del agua.
- El gradiente de velocidad de cada tramo.
- Las modificaciones necesarias para ajustar los gradientes a los teóricos obtenidos en laboratorio.

Los resultados son los siguientes:

TABLA 48. Gradientes de operación de los floculadores.

Unidad	Tramo	Q(m <sup>3</sup> /s)	Vol(m <sup>3</sup> )	T(min)	Hf(m)	G s <sup>-1</sup>
Fl <sub>1-1</sub> x 2	1º	0,128	45,7	5,95	0,06	42,4
	2º	0,128	69,1	9,00	0,04	28,1
	3º	0,128	69,7	9,08	0,02	19,8
Fl <sub>2-1</sub>	1º	0,236	170,0	12,0	0,01	12,0
Fl <sub>1-2</sub>	1º	0,214	116,5	9,07	0,02	19,8
	2º	0,214	116,5	9,07	0,02	19,8
	3º	0,214	116,5	9,07	0,01	14,0
	4º	0,214	116,5	9,07	0,01	12,0

Se observa que los gradientes de floculación que se dan en la planta son muy irregulares al compararseles entre sí. Sólo el floculador uno de la planta uno Fl<sub>1-1</sub> presenta tres zonas de gradientes diferenciados pero el tiempo de mezcla es excesivo.

Los otros dos floculadores proporciona muy poca agitación al agua coagulada en periodos de tiempo muy largos.

**5.2.3 Tamaño del flóculo producido, tiempo de aparición del mismo y eficiencia comparativa del proceso.** A nivel de laboratorio se procedió a realizar un ensayo de jarras convencional simulando las condiciones ideales encontradas para mezcla rápida y floculación. Durante el ensayo se estuvo atento a tomar el tiempo de aparición del flóculo.

Después se procedió a calificar el tamaño de éste mediante el índice de floculación de Willcomb dado en la Tabla 49.

**TABLA 49.** Índice de floculación de Willcomb.

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

A nivel de la planta, se tomaron muestras de agua en distintos tramos del floculador. Se determinó el punto en que aparece el floc y el volumen parcial de la unidad hasta ese punto. Así el tiempo inicial de formación del flóculo está dado por:

$$t_p = \frac{V}{Q} = \frac{\text{Volumen parcial}}{\text{Caudal de la unidad}}$$

Así mismo se calificó el tamaño del flóculo a la salida de cada uno de los floculadores. Los resultados encontrados estan a continuación:

**TABLA 50.** Tiempo de aparición del floc e índice de Willcomb, en ensayo en laboratorio.

Dosis 57 ppm	M.R. = 30 segundos a 100 rpm
$T_0 = 22$ U.N.T.	M.L. = 15 min a 50 rpm
$T_f = 2,6$	SED = 10 min.
Tiempo de aparición del floc. = $t_L = 2$ min.	
Índice de Willcomb = $I_L = 8$	

**TABLA 51.** Tiempo de aparición del floc e índice de Willcomb, encontrado en la planta.

Floculador	1 - 1	$t_p = 1,5$ min $I_p = 6$ $I = t_p/t_L = 6/8 = 0,75$ $T_f = 3,4$ U.N.T.
Floculador	2 - 1	$t_p = 3,2$ min $I_p = 4$ $I = t_p/t_L = 4/8 = 0,50$ $T_f = 6,5$ U.N.T.
Floculador	1 - 2	$t_p = 2,8$ min $I_p = 4$ $I = t_p/t_1 = 4/8 = 0,50$ $T_f = 4,6$ U.N.T.

**Eficiencia comparativa del proceso.** Comparamos los valores de turbiedad residual obtenidos en el ensayo en el laboratorio con los de turbiedad residual para cada floculador.

Calculamos el índice de aglomeración en el laboratorio como:

$$A_L = \frac{1}{T_f} - \frac{1}{T_o} = \frac{1}{2,6} - \frac{1}{22,0} = 0,34$$

y con los valores de turbiedad final tomadas de los jarras con agua floculada en la planta y dejada sedimentar por diez minutos, calculamos el índice de aglomeración de la planta en igual forma.

Al comparar estos dos índices se obtien un valor de la eficiencia de la unidad en la remoción de turbiedad. Ver Tabla 52.

**TABLA 52.** Eficiencia comparativa de la floculación.

Lugar de la prueba	Turbiedad en U.N.T.	Indice Aglomer.	Eficiencia $(A_P/A_L) \times 100$
Laboratorio	$T_L = 2,6$	0,34	100,0
Floculador 1-1	$T_P = 3,4$	0,25	73,5
Floculador 2-1	$T_P = 6,5$	0,11	32,4
Floculador 1-2	$T_P = 4,6$	0,17	50,0

5.2.4 Caudal real de trabajo de los floculadores. Para determinar el caudal real de trabajo de cada uno de los floculadores nos valemos de los resultados del ensayo de trazadores realizado en la unidad de mezcla rápida.

Puesto que se tomaron las muestras en los tubos a la salida de esta cámara, la proporción porcentual del total de trazador correspondiente a cada punto será igual a el porcentaje del caudal total que va a cada uno de los floculadores. Esta proporción y caudales correspondientes son los mostrados en la Tabla 53.

**TABLA 53.** Caudal real de trabajo de los floculadores.

Lugar de la prueba	Sumatoria de cloruros	Porcentaje	Caudal	
			(m <sup>3</sup> /día)	(m <sup>3</sup> /s)
Floculador 1-1	368,75	36,0 %	21.600	0,250
Floculador 2-1	348,60	34,0 %	20.400	0,236
Floculador 1-2	308,25	30,0 %	18.000	0,208
Totales	1.025,60	100.0 %	60.000	0,694

Estos valores difieren considerablemente sólo cuando uno de los floculadores presenta demasiados lodos depositados. Se encontró, así que la distribución de caudales es equitativa y por ser las unidades de igual longitud, los parámetros de control serán muy parecidos cuando se logre adaptar apropiadamente los floculadores que antes eran mecánicos.

**5.2.5 Período de retención y características hidráulicas de los floculadores.** Para determinar estas variables realizamos ensayos de trazadores en cada uno de los floculadores. El procedimiento seguido es el descrito al evaluar la mezcla rápida y se resume así:

Determinamos la concentración inicial de cloruros, el volumen útil de la unidad, el caudal de la misma, el peso de trazador requerido, el período teórico de retención, los sitios y los tiempos de muestreo.

Lanzamos la solución con el trazador al inicio de la unidad en estudio y se hace la toma de muestras en los sitios y tiempos asignados. Determinamos la concentración de cloruros de cada muestra, graficamos la curva de variación de concentración de trazador y procedemos a hacer el análisis según el modelo simplificado de Wolf-Resnick.

Se realizaron ensayos de trazadores en las tres unidades de floculación. Los datos, resultados y análisis de cada una de ellas se presenta a continuación.

**Ensayo en el floculador uno de la planta uno. Fl1-1**

Dimensiones de la unidad:

Longitud: 30,33 m, Ancho: 2 x 1,6 m, Altura: 5,8 a 6,1 m

Volumen total = 577,2 - 103 (retardadores) = 474,2 m<sup>3</sup>

Volumen útil al momento del ensayo: 382,5 m<sup>3</sup>

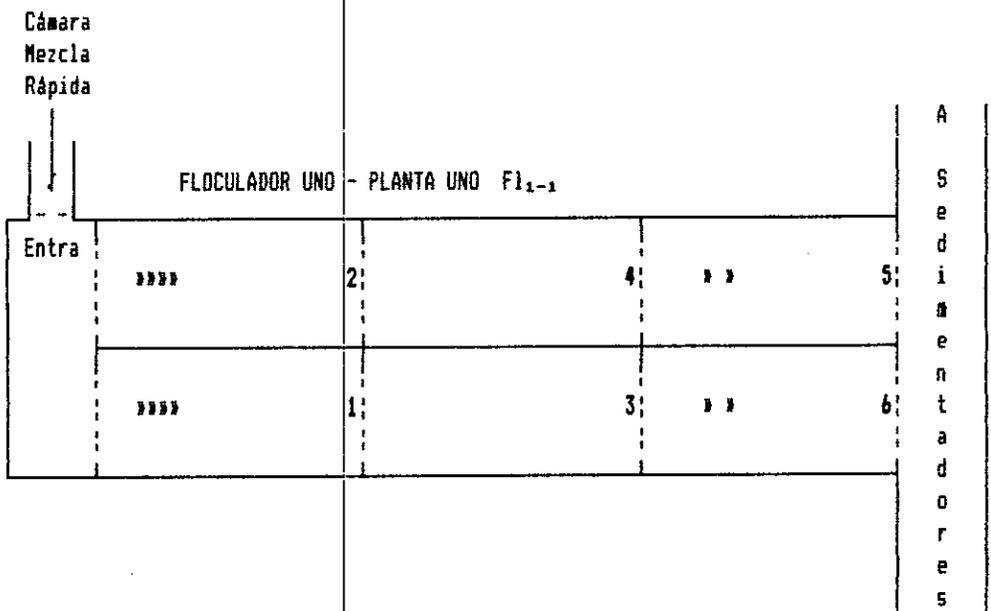
Caudal afluyente: 0,250 m<sup>3</sup>/s

Periodo teórico de retención: T<sub>0</sub> = V/Q = 25,5 minutos

Peso de trazador a utilizar en la prueba:

$$W = \frac{385,5 \times 50 \times 1,65}{985} = 32,04 \text{ kg}$$

Dado que el floculador se encuentra dividido longitudinalmente en dos, resultaron seis sitios de toma de muestras localizadas al final de cada una de las tres zonas de diferentes gradientes de agitación presentados por la unidad. La figura muestra la localización de dichos puntos:



Los tiempos reales de detención encontrados hasta cada sección de toma de muestras se presentan en la Tabla 54. Allí se resumen también los tipos de flujo que se dan.

**TABLA 54.** Condiciones hidráulicas en el floculador uno de la planta uno, según ensayo de trazadores.

Punto de muestreo	$T_c$ (s)	$t_p$ (s)	zonas muertas	flujo a pistón	flujo mezclado
1	360	290	0,38	0,26	0,36
2	360	288	0,35	0,28	0,37
3	900	630	0,29	0,40	0,31
4	900	540	0,45	0,38	0,17
5	1.500	1.350	0,30	0,50	0,20
6	1.500	1.050	0,37	0,45	0,18
1ª zona	360	289	0,37	0,27	0,36
2ª zona	900	585	0,37	0,39	0,24
3ª zona	1.500	1.200	0,34	0,48	0,18

Es de resaltar la presencia de zonas muertas en toda la unidad, el predominio del flujo mezclado en la primera sección floculador, y la presencia creciente de flujo a pistón en los otros dos tramos.

Las zonas muertas se están originando muy seguramente por la falta de algunas tablas en los retardadores superiores de madera.

El tiempo de retención de la unidad es de veinte minutos, cinco más que el deseable a aplicar a agua de esa calidad según se obtuvo en el ensayo de jarras.

Ensayo en el floculador uno de la planta dos. F<sub>1-2</sub>

Dimensiones de la unidad:

Longitud: 29,48 m, Ancho: 3,6 m, Altura: 4,6 m

Volumen total = 488,0 m<sup>3</sup>

Volumen útil al momento del ensayo: 466,6 m<sup>3</sup>

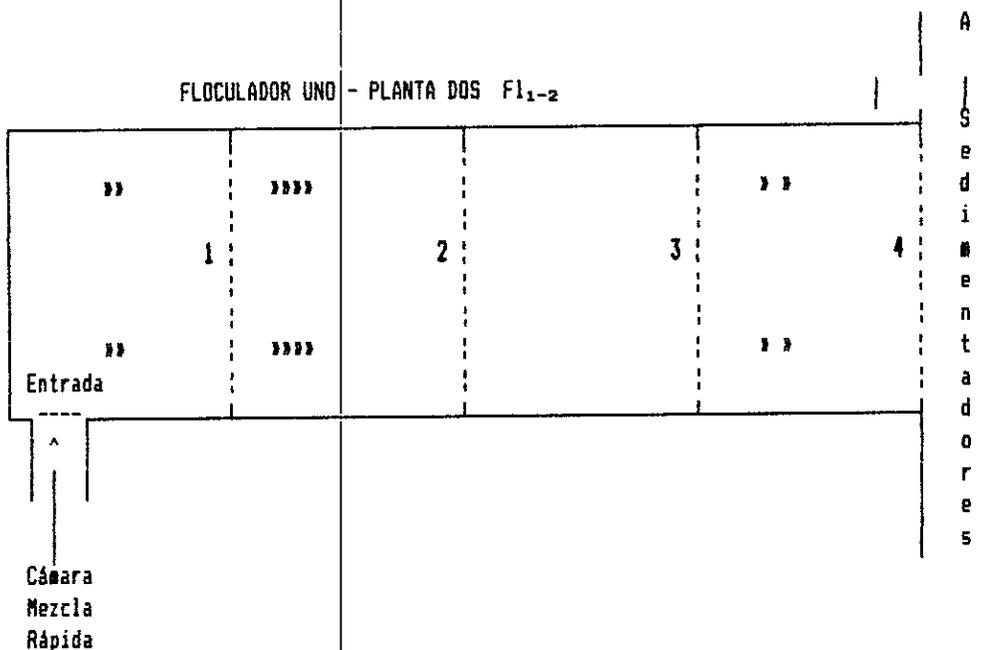
Caudal afluyente: 0,209 m<sup>3</sup>/s

Periodo teórico de retención: T<sub>0</sub> = V/Q = 37,0 minutos

Peso de trazador a utilizar en la prueba:

$$W = \frac{466,6 \times 50 \times 1,65}{985} = 39,0 \text{ kg}$$

Para el estudio de las características hidráulicas en esta unidad, se tomaron muestras en los puntos 1/4, 1/2, 3/4, y 4/4 de su longitud, como se ilustra en la figura.



En la Tabla 55 se resumen las principales características del flujo para cada zona del floculador. En la misma se observa como en esta unidad predominan las zonas muertas debido a una adecuada disposición de los retardadores, tanto inferiores como superiores.

**TABLA 55.** Condiciones hidráulicas en el floculador uno de la planta dos, según ensayo de trazadores.

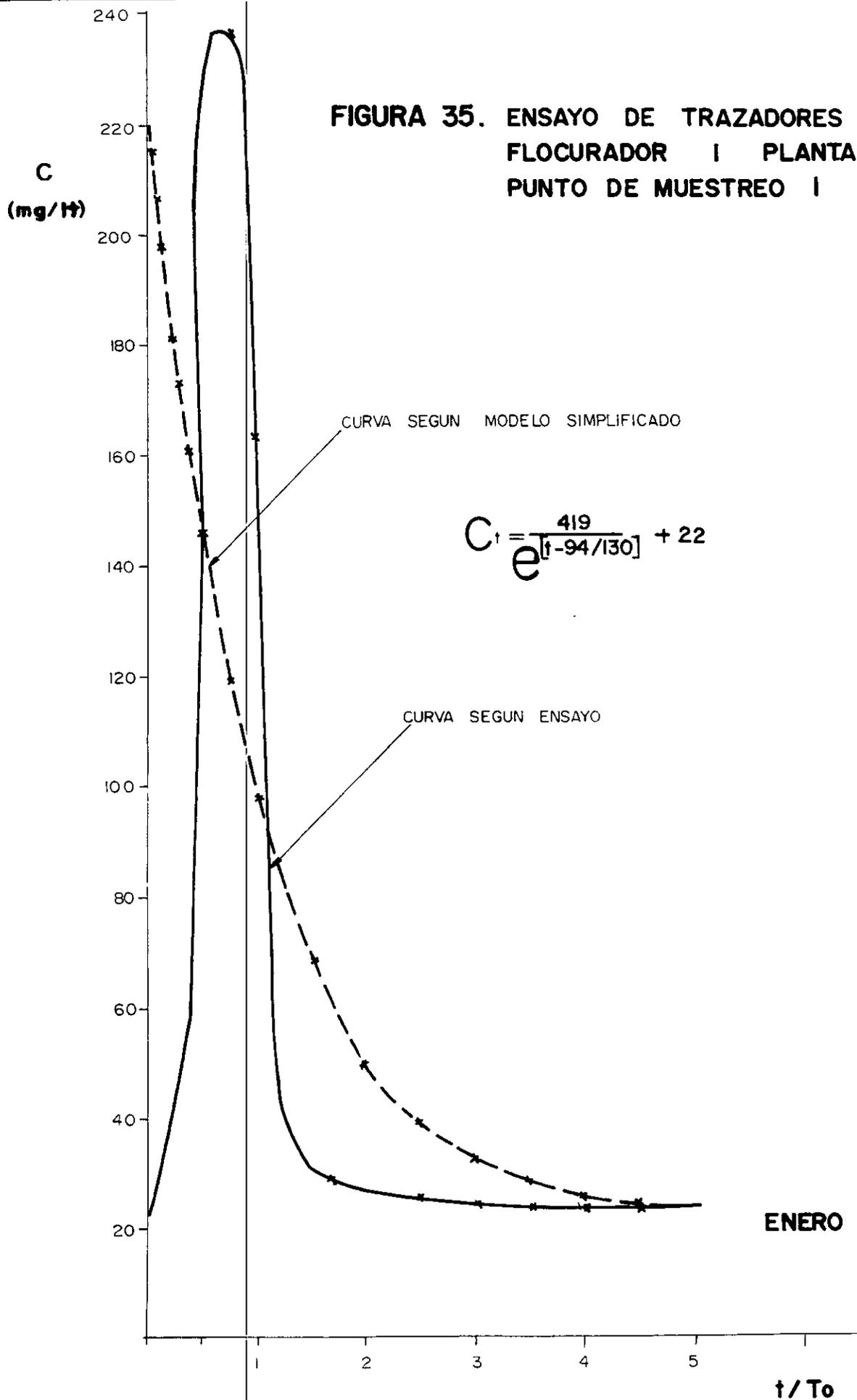
Punto de muestreo	T <sub>o</sub> (s)	t <sub>p</sub> (s)	zonas muertas	flujo a pistón	flujo mezclado
1	540	216	- 0,05	0,20	0,85
2	1.080	486	0,20	0,20	0,60
3	1.620	972	0,50	0,25	0,25
4	2.160	1.080	0,50	0,25	0,25

A continuación se incluye un análisis detallado del ensayo de trazadores para cada punto de toma de muestras. Tablas 56 a 62 y Figuras 35 a 54.

**TABLA 56.** Datos de ensayo de trazadores - Unidad de Floculación uno. - Planta uno. - Enero 19 de 1990

Número de orden	t min	PUNTO 1		PUNTO 2	
		AgNO <sub>3</sub> ml	Cloruros mg/lt	AgNO <sub>3</sub> ml	Cloruros mg/lt
1	5	33,5	237,6	30,2	214,2
2	10	4,0	28,4	4,2	29,8
3	15	3,5	24,8	3,4	24,1
4	18	3,4	24,1	3,4	24,1
5	21	3,5	24,8	3,7	26,2
6	24	3,4	24,1	3,3	23,4
7	27	3,3	23,4	3,2	22,7
8	30	3,3	23,4	3,2	22,7
9	33	3,2	22,7	3,3	23,4
10	36	3,0	21,3	3,3	23,4

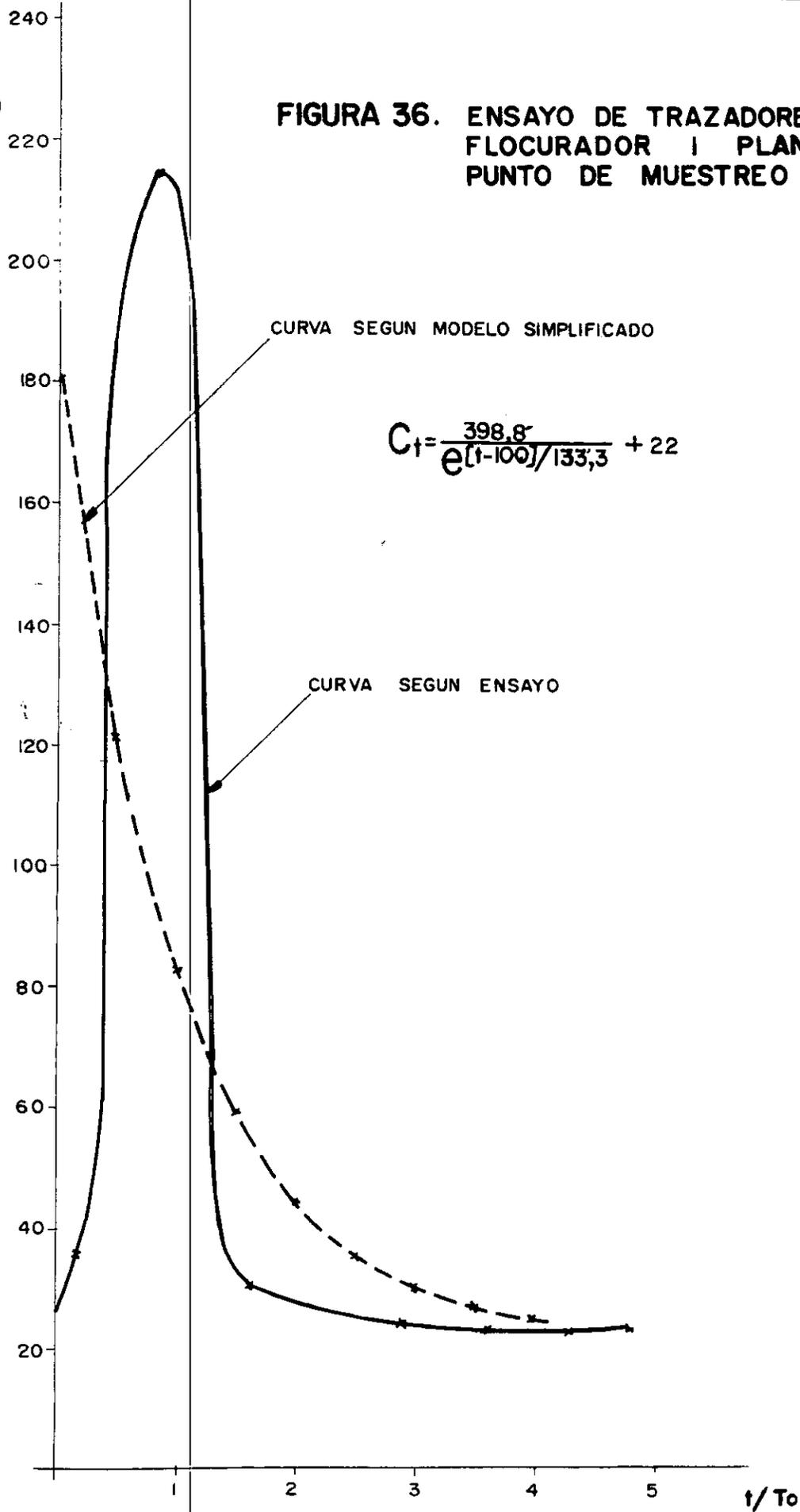
FIGURA 35. ENSAYO DE TRAZADORES  
FLOCURADOR | PLANTA |  
PUNTO DE MUESTREO |



ENERO 19/90

C  
(mg/l)

FIGURA 36. ENSAYO DE TRAZADORES  
FLOCURADOR 1 PLANTA 1  
PUNTO DE MUESTREO 2



ENERO 19/90

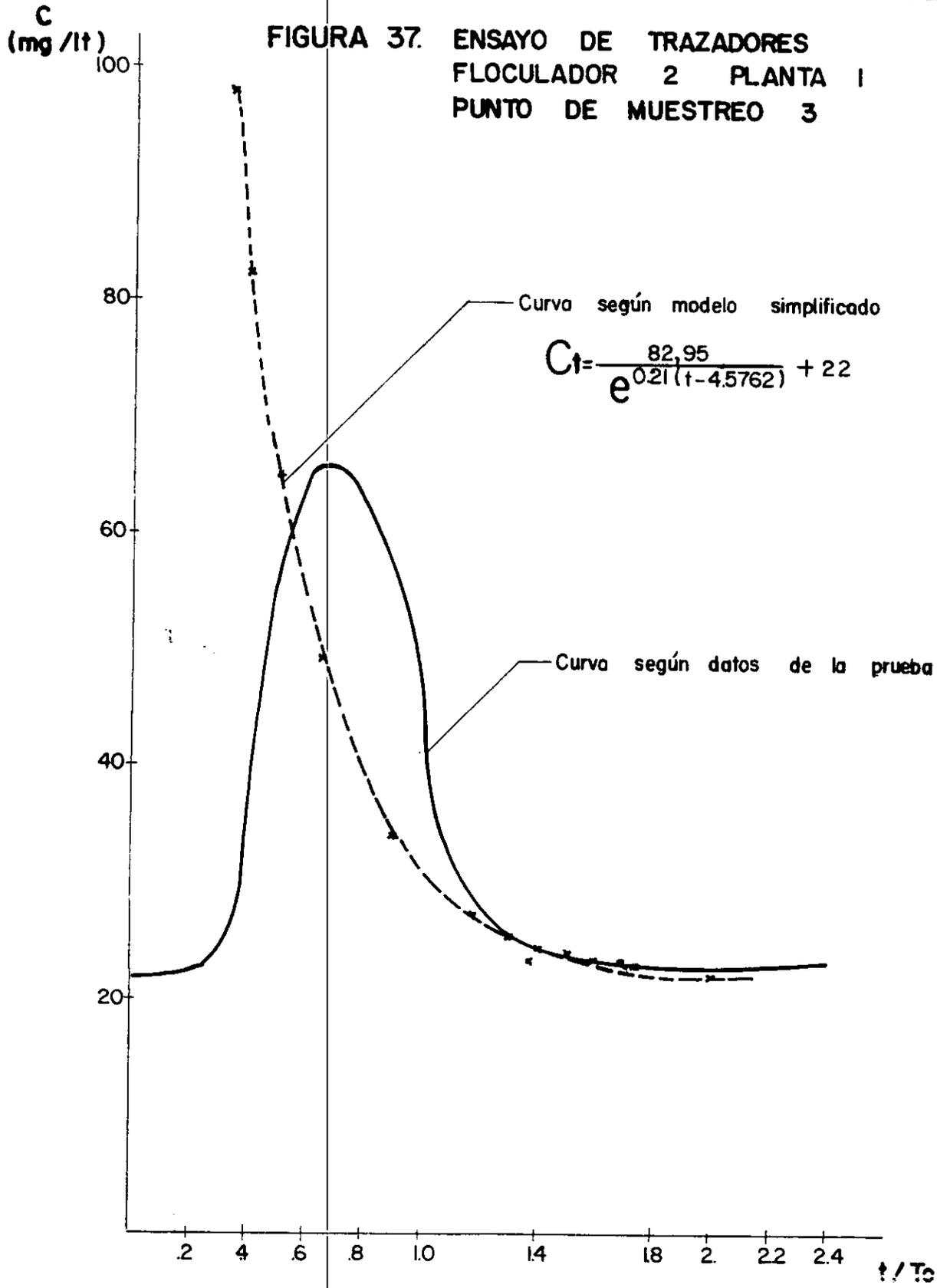
**TABLA 57.** Datos de ensayo de trazadores - Unidad de Floculación uno. - Planta uno. Enero 19 de 1990

Número de orden de muestra	t min	PUNTO 3		PUNTO 4	
		AgNO <sub>3</sub> ml	Cloruros mg/lt	AgNO <sub>3</sub> ml	Cloruros mg/lt
1	5	3,3	23,4	3,5	24,8
2	10	9,3	66,0	24,0	170,2
3	15	7,0	49,6	4,0	28,4
4	18	3,8	26,9	3,2	22,7
5	21	3,3	23,4	3,5	24,8
6	24	3,3	23,4	3,3	23,4
7	27	3,3	23,4	3,1	22,0
8	30	3,3	23,4	3,0	21,3
9	33	3,3	23,4	3,3	23,4
10	36	3,5	24,8	3,1	22,0

**TABLA 58.** Datos de ensayo de trazadores - Unidad de Floculación uno. - Planta uno. Enero 19 de 1990

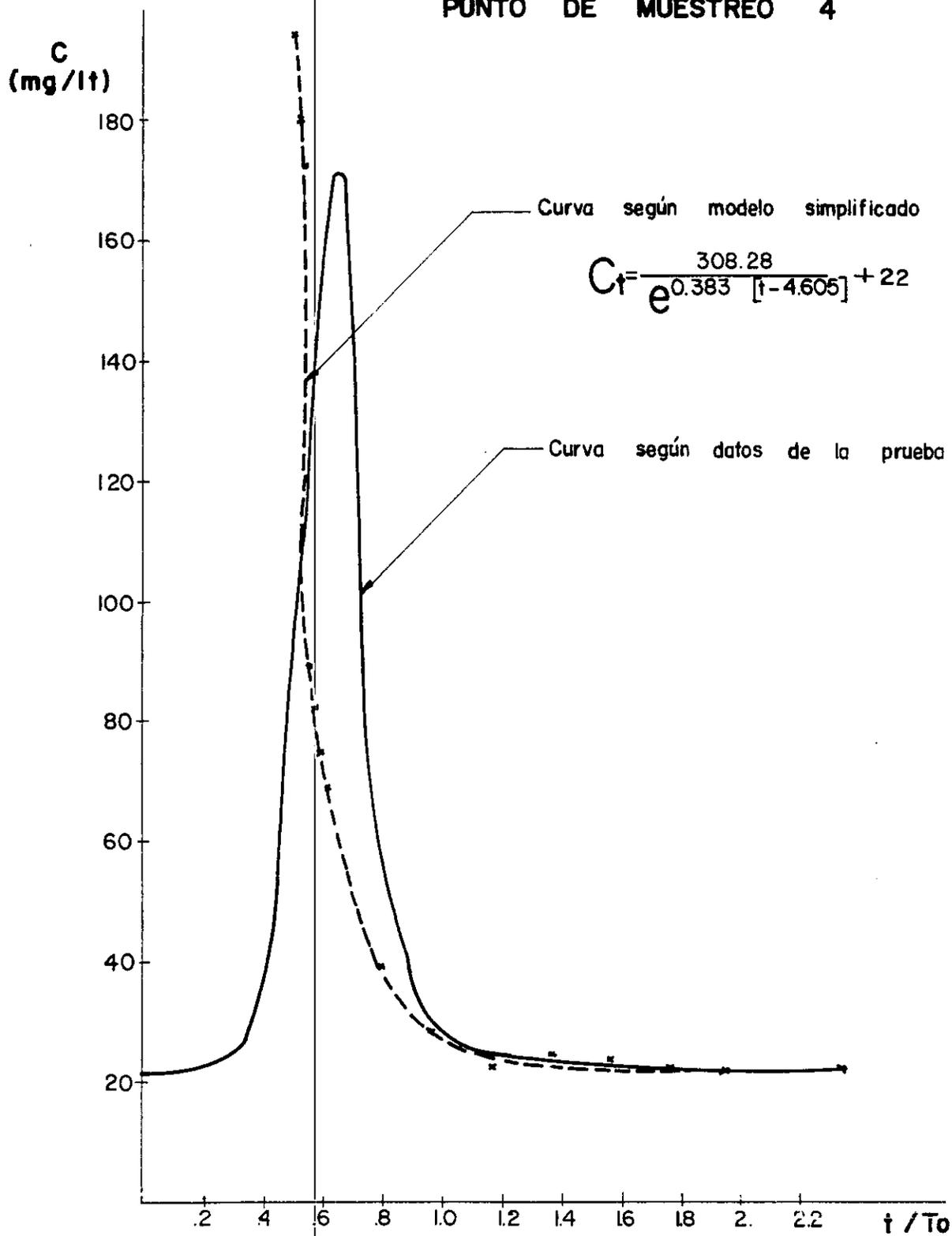
Número de orden de muestra	t min	PUNTO 5		PUNTO 6	
		AgNO <sub>3</sub> ml	Cloruros mg/lt	AgNO <sub>3</sub> ml	Cloruros mg/lt
1	5	3,3	23,4	3,4	24,1
2	10	3,4	24,1	3,5	24,8
3	15	6,0	42,6	10,5	74,5
4	18	14,6	103,5	21,9	155,3
5	21	20,3	144,0	8,3	58,9
6	24	9,0	63,8	3,7	26,2
7	27	4,5	31,9	3,1	22,0
8	30	3,5	24,8	3,3	23,4
9	33	3,4	24,1	3,1	22,0
10	36	3,3	23,4	3,1	22,0

FIGURA 37. ENSAYO DE TRAZADORES  
FLOCULADOR 2 PLANTA 1  
PUNTO DE MUESTREO 3



ENERO 19/90.

FIGURA 38. ENSAYO DE TRAZADORES  
FLOCURADOR 2 PLANTA 1  
PUNTO DE MUESTREO 4



ENERO 19 / 90

**FIGURA 39. ENSAYO DE TRAZADORES  
FLOCULADOR I PLANTA I  
PUNTO DE MUESTREO 5**

**C  
(mg/lit)**

220

200

180

160

140

120

100

80

60

40

20

CURVA SEGUN MODELO SIMPLIFICADO

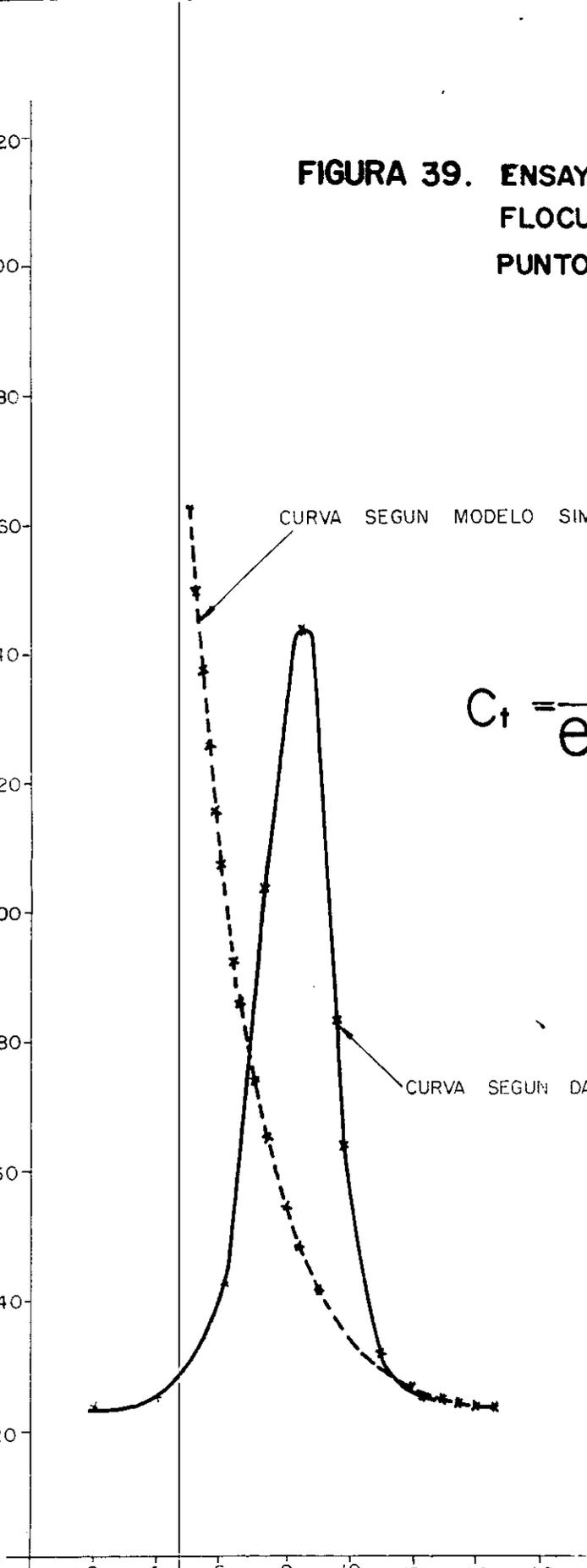
$$C_t = \frac{181,4}{e^{(t-750)/305}} + 22$$

CURVA SEGUN DATOS DE LA PRUEBA

**ENERO 19/90**

2 4 6 8 10 12 14 16

**t/To**



**FIGURA 40. ENSAYO DE TRAZADORES  
FLOCULADOR I PLANTA I  
PUNTO DE MUESTREO 6**

**C**  
**(mg/lt)**

240  
220  
200  
180  
160  
140  
120  
100  
80  
60  
40  
20

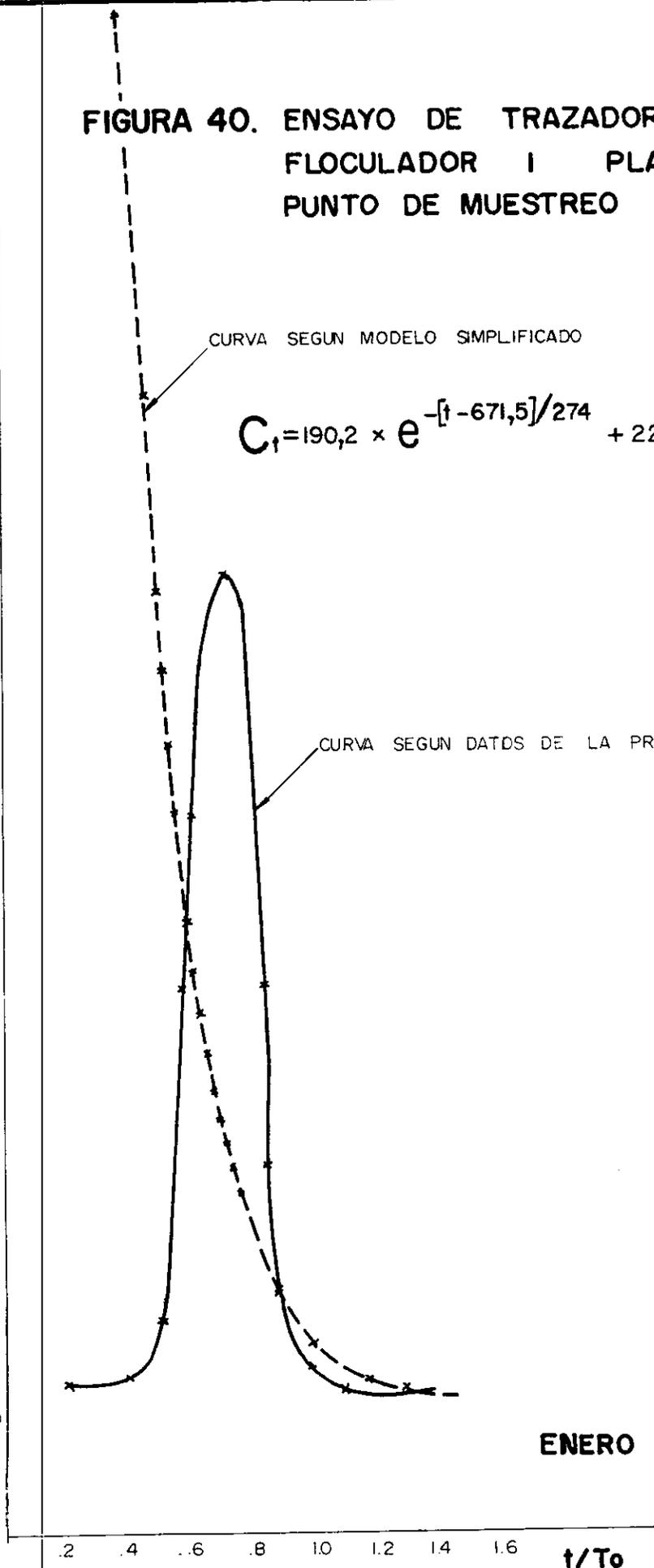
CURVA SEGUN MODELO SIMPLIFICADO

$$C_t = 190,2 \times e^{-[t - 671,5]/274} + 22$$

CURVA SEGUN DATOS DE LA PRUEBA

.2 .4 .6 .8 1.0 1.2 1.4 1.6 **t/To**

**ENERO 19/90**



**TABLA 59.** Resultados de ensayo de trazadores - Unidad de Floculación uno. - Planta uno. Ene 19/90.

$T_0 = 6 \text{ min}$			PUNTO 1				PUNTO 2			
Número de orden	t min	t/ $T_0$	C - $C_0$ mg/lit	$\Sigma(C-C_0)$ mg/lit	F(t)	1-F(t)	C - $C_0$ mg/lit	$\Sigma(C-C_0)$ mg/lit	F(t)	1-F(t)
1	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	1,00	0,0	0,0	0,00	1,00
2	1,2	0,20	21,7	21,7	0,03	0,97	14,7	14,7	0,02	0,98
3	2,4	0,40	48,7	70,4	0,10	0,90	68,7	83,4	0,10	0,90
4	3,6	0,60	213,7	284,1	0,40	0,60	182,7	266,1	0,33	0,67
5	4,8	0,80	217,0	501,1	0,70	0,30	194,0	460,1	0,58	0,42
6	6,0	1,00	148,7	649,8	0,90	0,10	183,7	643,8	0,81	0,19
7	7,2	1,20	23,7	673,5	0,94	0,06	93,7	737,5	0,93	0,07
8	8,4	1,40	10,7	684,2	0,95	0,05	14,7	752,2	0,95	0,05
9	9,6	1,60	6,7	690,9	0,96	0,04	8,7	760,9	0,96	0,04
10	10,8	1,80	5,8	696,7	0,97	0,03	7,7	768,6	0,97	0,03
11	12,0	2,00	4,7	701,4	0,98	0,02	6,7	775,3	0,98	0,02
12	13,2	2,20	4,2	705,6	0,98	0,02	5,7	781,0	0,98	0,02
13	14,4	2,40	4,2	709,8	0,99	0,01	4,7	785,7	0,99	0,01
14	15,6	2,60	3,6	713,4	0,99	0,01	3,7	789,4	0,99	0,01
15	16,8	2,80	3,0	716,4	1,00	0,00	2,7	792,1	1,00	0,00
16	18,0	3,00	2,7	719,1	1,00	0,00	2,7	794,8	1,00	0,00
$T_0 = 15 \text{ min}$			PUNTO 3				PUNTO 4			
Número de orden	t min	t/ $T_0$	C - $C_0$ mg/lit	$\Sigma(C-C_0)$ mg/lit	F(t)	1-F(t)	C - $C_0$ mg/lit	$\Sigma(C-C_0)$ mg/lit	F(t)	1-F(t)
1	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	1,00	0,0	0,0	0,00	1,00
2	1,5	0,10	0,5	0,5	0,00	1,00	0,2	0,2	0,00	1,00
3	3,0	0,20	0,7	1,2	0,00	1,00	1,4	1,6	0,00	1,00
4	4,5	0,30	2,2	3,4	0,01	0,99	3,2	4,8	0,01	0,99
5	6,0	0,40	11,7	15,1	0,06	0,94	15,7	20,5	0,05	0,95
6	7,5	0,50	33,2	48,3	0,19	0,81	73,7	94,2	0,22	0,78
7	9,0	0,60	42,7	91,0	0,35	0,65	133,7	227,9	0,54	0,46
8	10,5	0,70	44,7	135,7	0,52	0,48	118,7	346,6	0,81	0,19
9	12,0	0,80	40,7	176,4	0,68	0,32	42,7	389,3	0,91	0,09
10	13,5	0,90	34,7	211,1	0,81	0,19	18,7	408,0	0,96	0,04
11	15,0	1,00	23,7	234,8	0,90	0,10	6,7	414,7	0,97	0,03
12	16,5	1,10	10,7	245,5	0,95	0,05	3,7	418,4	0,98	0,02
13	18,0	1,20	6,7	252,2	0,97	0,03	2,7	421,1	0,99	0,01
14	19,5	1,30	3,7	255,9	0,99	0,01	1,7	422,8	0,99	0,01
15	21,0	1,40	2,1	258,0	0,99	0,01	1,7	424,5	1,00	0,00
16	22,5	1,50	1,7	259,7	1,00	0,00	1,2	425,7	1,00	0,00

Análisis de la curva de concentración de trazador para el punto 1:

$$\phi = 0,26 \quad \tan \alpha = 1,194 \quad T_o = 360 \text{ s} \quad t_p = 290 \text{ s} \quad t_{10} = 144 \text{ s} \quad t_{50} = 240 \text{ s} \quad t_{90} = 360 \text{ s}$$

Tiempo en el que aparece el trazador en el efluente :  $t_1 = \phi T_o = 0,26 \times 360 = 94 \text{ s}$

Tiempo en que C es mayor que  $C_{max}/2$  :  $t_c = 213 \text{ s}$     Tiempo en que C es mayor que  $C_{max}/10$  :  $t_b = 371 \text{ s}$

Índice de dispersión de Morrill:  $I_M = t_{90} / t_{10} = 360 / 144 = 2,50$     Flujo mezclado

$t_1 / T_o = 94 / 360 = 0,26 < 0,30$     Predomina flujo mezclado y existe la tendencia a cortocircuito

$t_m / T_o = 240 / 360 = 0,67 < 1,00$     Presencia de cortocircuitos o zonas muertas

$t_p / T_o = 290 / 360 = 0,81$     Predomina el flujo mezclado

$t_b / T_o = 371 / 360 = 1,03$

$t_c / T_o = 213 / 360 = 0,59$     Predomina el flujo mezclado

Excentricidad de la curva:

$$e = \frac{(t_r - t_p) - (t_p - t_1)}{T_o} = \frac{(1080 - 290) - (290 - 94)}{360} = 1,65 \quad \text{Flujo mezclado}$$

Funciones de flujo :

$$p = \frac{\phi \tan \alpha}{0,434 + \phi \tan \alpha} = \frac{0,26 \times 1,194}{0,434 + 0,26 \times 1,194} = 0,42$$

$$\text{Zonas muertas: } m = 1 - \frac{\phi}{p} = 1 - \frac{0,26}{0,42} = 0,38$$

Fracción de flujo a pistón:  $p (1 - m) = 0,42 \times (1 - 0,38) = 0,26$

Fracción de flujo mezclado:  $(1 - p) (1 - m) = (1 - 0,42) (1 - 0,38) = 0,36$

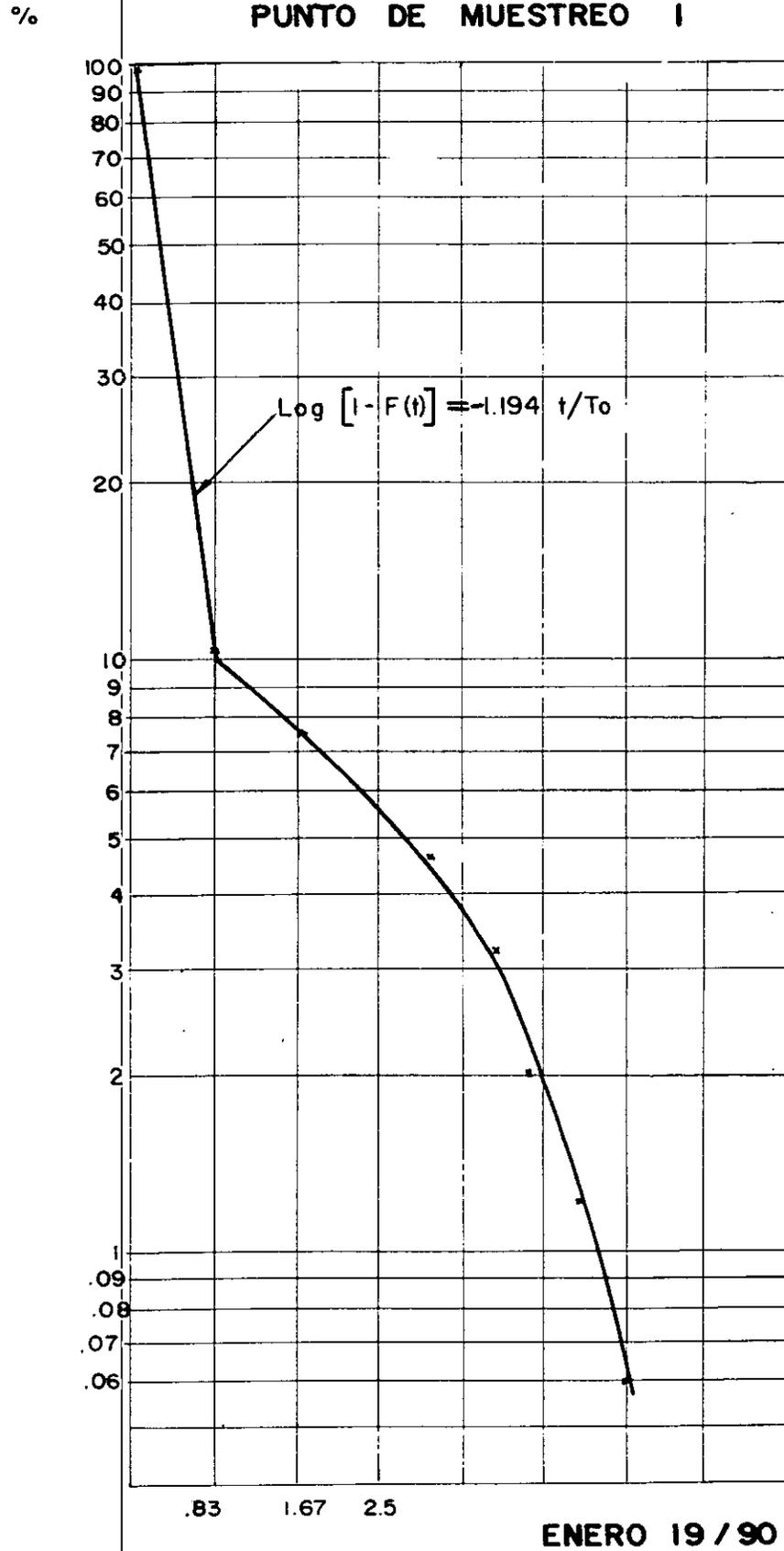
Concentración inicial de cloruros:

$$C_o = \frac{Q \cdot \delta t \cdot \Sigma Cl}{(1 - p) (1 - m) V} = \frac{0,133 \times 60 \times [1,20 \times 719,1]}{(1 - 0,42) (1 - 0,38) 45,7} = 419,0$$

Ecuación de la curva de la función  $1 - F(t)$  según el modelo simplificado de Wolf y Resnick :

$$C_t = C_o \left[ \frac{1}{(1 - 0,42)(1 - 0,38)} \left( \frac{t}{360} - 0,42(1 - 0,38) \right) - (t - 94,0) / 130 \right] + 22 = C_o \left[ \dots \right] + 22$$

FIGURA 41. ENSAYO DE TRAZADORES  
 FLOCURADOR I PLANTA I  
 PUNTO DE MUESTREO I



Análisis de la curva de concentración de trazador para el punto 2:

$$\phi = 0,28 \quad \tan \alpha = 1,15 \quad T_o = 360 \text{ s} \quad t_p = 288 \text{ s} \quad t_{10} = 144 \text{ s} \quad t_{50} = 265 \text{ s} \quad t_{90} = 414 \text{ s}$$

Tiempo en el que aparece el trazador en el efluente :  $t_1 = \phi T_o = 0,28 \times 360 = 99 \text{ s}$

Tiempo en que C es mayor que  $C_{adm}/2$  :  $t_c = 263 \text{ s}$     Tiempo en que C es mayor que  $C_{adm}/10$  :  $t_b = 422 \text{ s}$

Índice de dispersión de Morrill:  $I_M = t_{90} / t_{10} = 414 / 144 = 2,88$     Flujo mezclado

$t_1 / T_o = 99 / 360 = 0,28 > 0,30$     Predomina flujo mezclado y existe tendencia a cortocircuito

$t_m / T_o = 265 / 360 = 0,74 < 1,0$     Presencia de zonas muertas

$t_p / T_o = 288 / 360 = 0,80$     Predomina el flujo mezclado

$t_b / T_o = 422 / 360 = 1,17$

$t_c / T_o = 263 / 360 = 0,73$     Flujo mezclado

Excentricidad de la curva:

$$e = \frac{(t_r - t_p) - (t_p - t_1)}{T_o} = \frac{(1.008 - 288) - (288 - 94)}{360} = 1,48$$

Funciones de flujo :

$$p = \frac{\phi \tan \alpha}{0,434 + \phi \tan \alpha} = \frac{0,28 \times 1,15}{0,434 + 0,28 \times 1,15} = 0,43$$

$$\text{Zonas muertas: } m = 1 - \frac{\phi}{p} = 1 - \frac{0,28}{0,43} = 0,35$$

Fracción de flujo a pistón:  $p (1 - m) = 0,43 \times (1 - 0,35) = 0,28$

Fracción de flujo mezclado:  $(1 - p) (1 - m) = (1 - 0,43) (1 - 0,35) = 0,37$

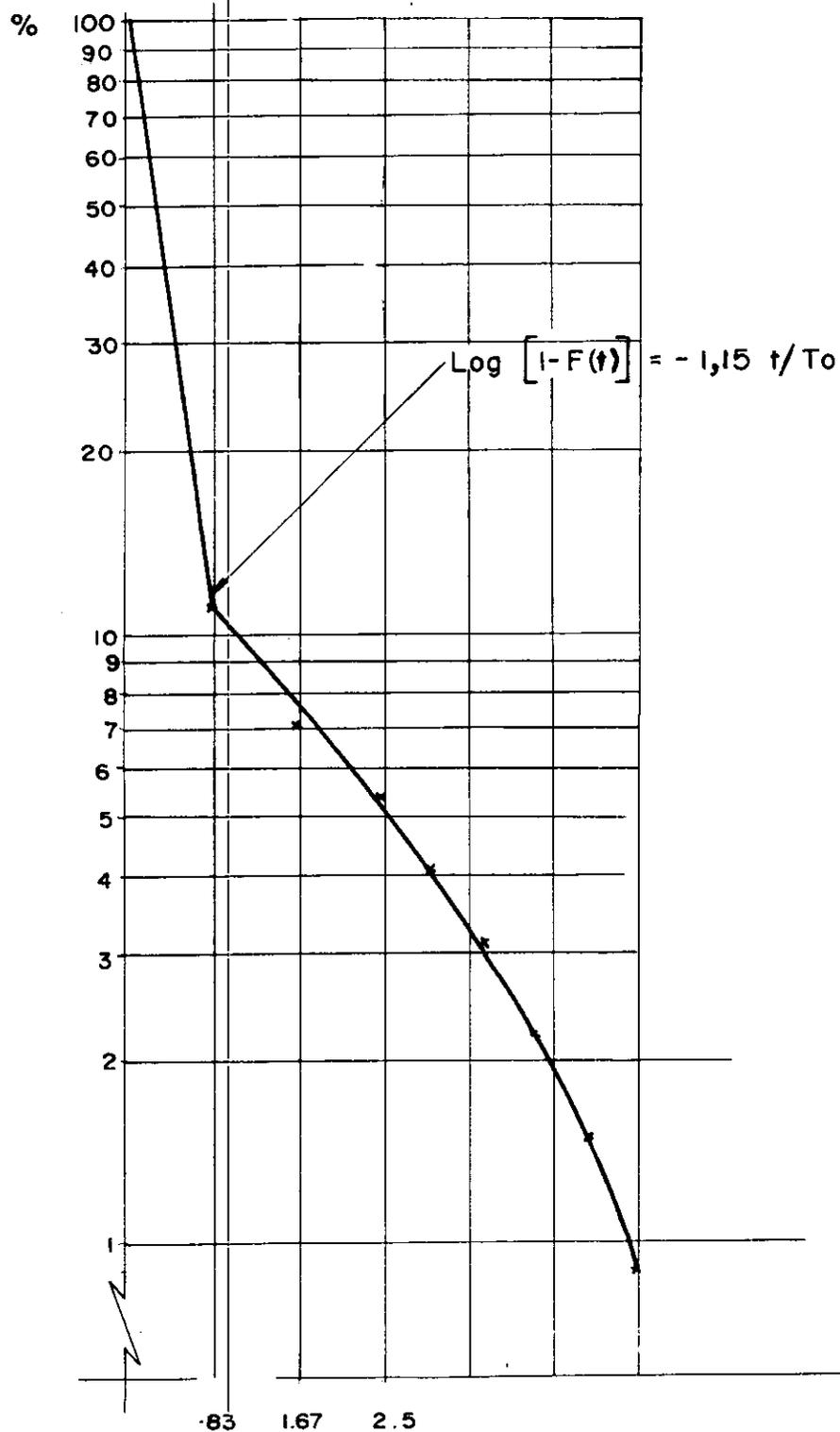
Concentración inicial de cloruros:

$$C_o = \frac{Q \cdot \delta t \cdot \Sigma C_l}{(1 - p) (1 - m) V} = \frac{0,118 \times 60 \times 1,2 \times 794,8}{(1 - 0,43) (1 - 0,35) 45,7} = 398,8$$

Ecuación de la curva de la función  $1 - F(t)$  según el modelo simplificado de Wolf y Resnick :

$$C_t = C_o \cdot e^{-\frac{t}{(1-0,43)(1-0,35) 360} - 0,43(1-0,35)} - [t - 1001/133,3] + 22 = C_o \cdot e^{-\dots} + 22$$

FIGURA 42. ENSAYO DE TRAZADORES  
FLOCURADOR 1 PLANTA 1  
PUNTO DE MUESTREO 2



ENERO 19/90

Análisis de la curva de concentración de trazador para el punto 3:

$$\phi = 0,40 \quad \tan \alpha = 1,405 \quad T_0 = 900 \text{ s} \quad t_p = 630 \text{ s} \quad t_{10} = 388 \text{ s} \quad t_{90} = 620 \text{ s} \quad t_{90} = 900 \text{ s}$$

Tiempo en el que aparece el trazador en el efluente :  $t_1 = \phi T_0 = 0,40 \times 900 = 360 \text{ s}$

Tiempo en que C es mayor que  $C_{max}/2$  :  $t_c = 560 \text{ s}$     Tiempo en que C es mayor que  $C_{max}/10$  :  $t_b = 854 \text{ s}$

Índice de dispersión de Morrill:  $I_M = t_{90} / t_{10} = 900 / 388 = 2,32$  Predomina el flujo a pistón

$t_1 / T_0 = 360 / 900 = 0,40 > 0,30$  Predomina flujo a pistón y no existe tendencia a cortocircuito

$t_m / T_0 = 620 / 900 = 0,69 < 1,00$  Presencia de zonas muertas

$t_p / T_0 = 630 / 900 = 0,70$  Predomina el flujo a pistón

$t_b / T_0 = 854 / 900 = 0,95$

$t_c / T_0 = 560 / 900 = 0,62$  Valor por debajo del correspondiente a flujo mezclado

Excentricidad de la curva:

$$e = \frac{(t_e - t_p) - (t_p - t_1)}{T_0} = \frac{(1.260 - 630) - (630 - 360)}{900} = 0,40 \quad \text{Predominio de flujo a pistón}$$

Funciones de flujo :

$$p = \frac{\phi \tan \alpha}{0,434 + \phi \tan \alpha} = \frac{0,40 \times 1,405}{0,434 + 0,40 \times 1,405} = 0,56$$

$$\text{Zonas muertas: } m = 1 - \frac{\phi}{p} = 1 - \frac{0,40}{0,56} = 0,29$$

Fración de flujo a pistón:  $p (1 - m) = 0,56 \times (1 - 0,29) = 0,40$

Fración de flujo mezclado:  $(1 - p) (1 - m) = (1 - 0,56) (1 - 0,29) = 0,31$

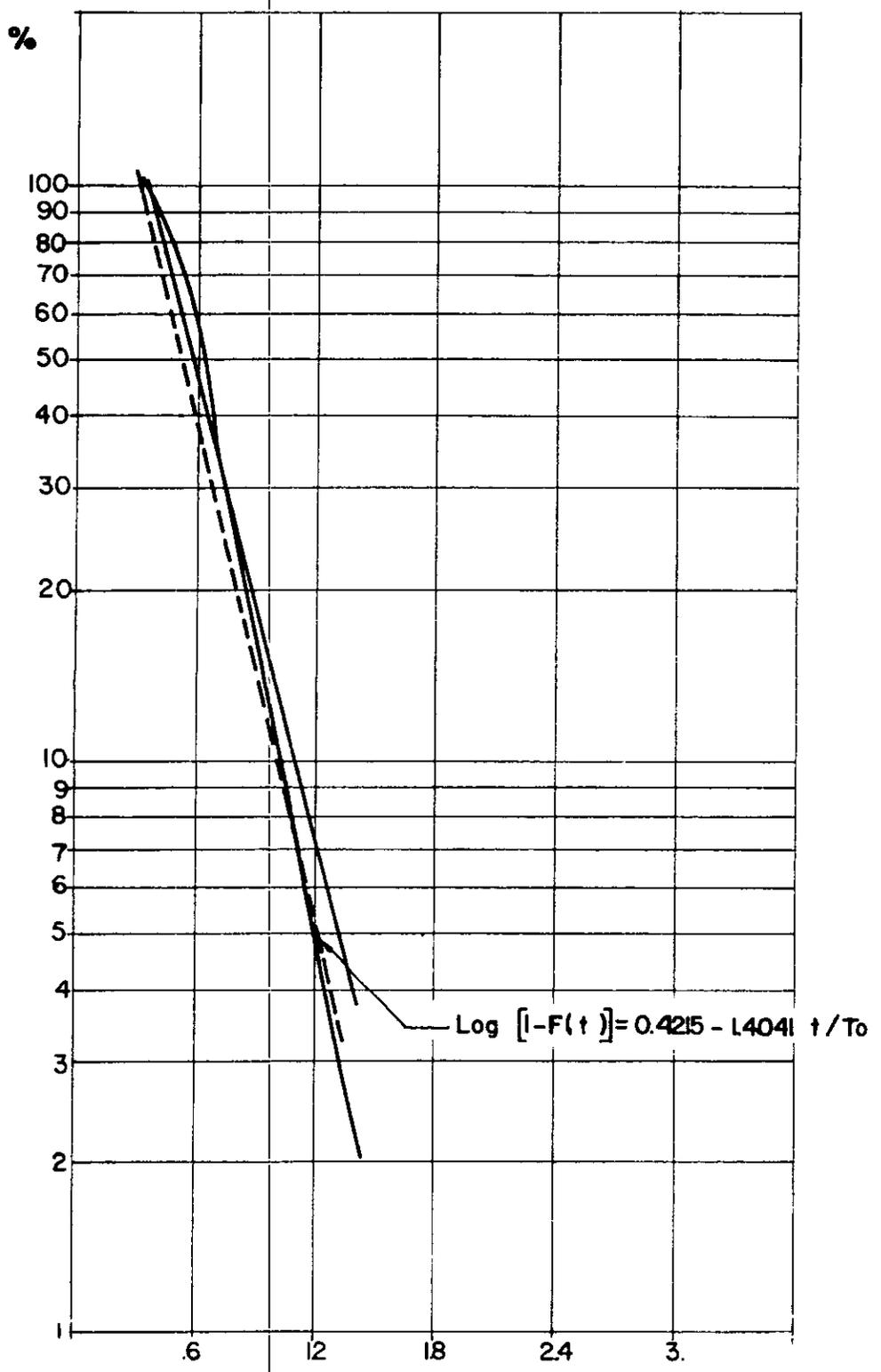
Concentración inicial de cloruros:

$$C_0 = \frac{\theta \cdot \delta t \cdot \Sigma C_l}{(1 - p) (1 - m) V} = \frac{0,113 \times 60 \times 1,5 \times 259,7}{(1 - 0,56) (1 - 0,29) 114,8} = 86,7$$

Ecuación de la curva de la función  $1 - F(t)$  según el modelo simplificado de Wolf y Resnick :

$$C_t = C_0 \left[ \frac{1}{(1 - 0,56)(1 - 0,29)} \left( \frac{t}{900} - 0,56(1 - 0,29) \right) \right] - (t - 358)/281 + 22 = C_0 \left[ \dots \right] + 22$$

FIGURA 43. ENSAYO DE TRAZADORES  
FLOCULADOR 2 PLANTA 1  
PUNTO DE MUESTREO 3



Análisis de la curva de concentración de trazador para el punto 4:

$$\phi = 0,38 \quad \tan \alpha = 2,5943 \quad T_o = 900 \text{ s} \quad t_p = 540 \text{ s} \quad t_{10} = 386 \text{ s} \quad t_{50} = 529 \text{ s} \quad t_{90} = 711 \text{ s}$$

Tiempo en el que aparece el trazador en el efluente :  $t_1 = \phi T_o = 0,38 \times 900 = 342 \text{ s}$

Tiempo en que C es mayor que  $C_{max}/2$  :  $t_c = 251 \text{ s}$     Tiempo en que C es mayor que  $C_{max}/10$  :  $t_b = 507 \text{ s}$

Índice de dispersión de Morrill:  $I_M = t_{90} / t_{10} = 711 / 386 = 1,84$     Predominio de flujo a pistón

$t_1 / T_o = 342 / 900 = 0,38 > 0,30$     Predomina flujo a pistón y no existe tendencia a cortocircuito

$t_m / T_o = 529 / 900 = 0,59 < 1,00$     Indica presencia de zonas muertas

$t_p / T_o = 540 / 900 = 0,60$     Predomina el flujo a pistón

$t_b / T_o = 507 / 900 = 0,56$

$t_c / T_o = 215 / 900 = 0,24$     Por debajo del valor correspondiente a mezcla completa

Excentricidad de la curva:

$$e = \frac{(t_r - t_p) - (t_p - t_1)}{T_o} = \frac{(1.140 - 540) - (540 - 342)}{900} = 0,78 \quad \text{Flujo a pistón}$$

Funciones de flujo :

$$p = \frac{\phi \tan \alpha}{0,434 + \phi \tan \alpha} = \frac{0,38 \times 2,5943}{0,434 + 0,38 \times 2,5943} = 0,69$$

$$\text{Zonas muertas: } m = 1 - \frac{\phi}{p} = 1 - \frac{0,38}{0,69} = 0,45$$

Fración de flujo a pistón:  $p (1 - m) = 0,69 \times (1 - 0,45) = 0,38$

Fración de flujo mezclado:  $(1 - p) (1 - m) = (1 - 0,69) (1 - 0,45) = 0,17$

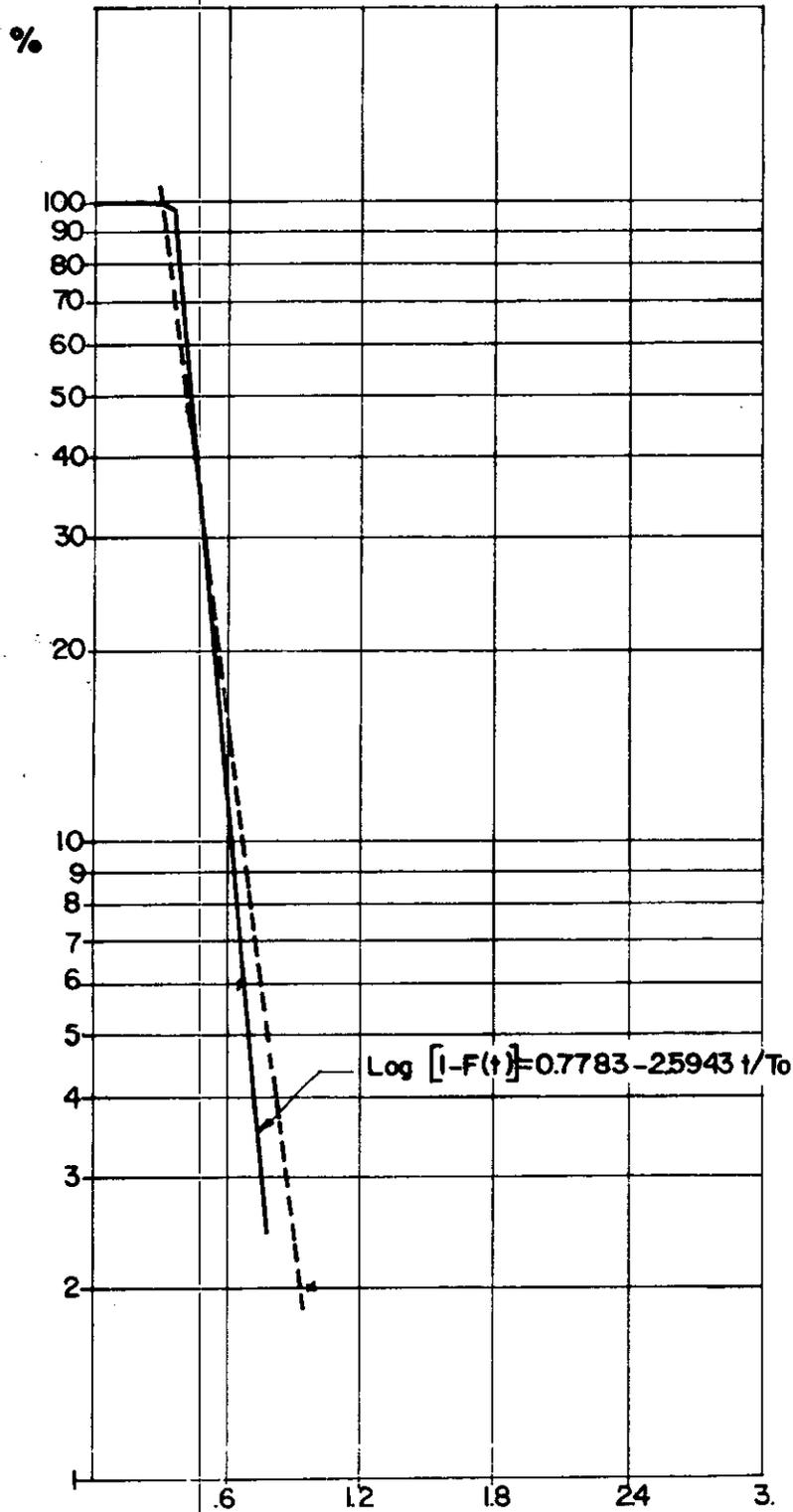
Concentración inicial de cloruros:

$$C_o = \frac{Q \cdot \delta t \cdot \Sigma Cl}{(1 - p) (1 - m) V} = \frac{0,118 \times 60 \times 1,5 \times 425,7}{(1 - 0,69) (1 - 0,45) 114,8} = 231,0$$

Ecuación de la curva de la función  $1 - F(t)$  según el modelo simplificado de Wolf y Resnick :

$$C_t = C_o \cdot e^{-\frac{t}{(1-0,69)(1-0,45) \cdot 900} - 0,69(1-0,45)} - (t - 341,93)/133,9 + 22 = C_o \cdot e^{-\dots} + 22$$

FIGURA 44. ENSAYO DE TRAZADORES  
 FLOCULADOR 2 PLANTA 1  
 PUNTO DE MUESTREO 4



ENERO 19 / 90

**TABLA 60.** Resultados de ensayo de trazadores - Unidad de Floculación uno. - Planta uno. Ene 19/90.  $T_0 = 25$  min

Número de orden	t min	t/T <sub>0</sub>	PUNTO 5				PUNTO 6			
			C - C <sub>0</sub> mg/lt	Σ(C-C <sub>0</sub> ) mg/lt	F(t)	1-F(t)	C - C <sub>0</sub> mg/lt	Σ(C-C <sub>0</sub> ) mg/lt	F(t)	1-F(t)
1	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	1,00	0,0	0,0	0,00	1,00
2	2,5	0,10	0,7	0,7	0,00	1,00	1,5	1,5	0,00	1,00
3	5,0	0,20	1,2	1,9	0,00	1,00	2,7	4,2	0,01	0,99
4	7,5	0,30	1,7	3,6	0,01	0,99	2,7	6,9	0,02	0,98
5	10,0	0,40	4,7	8,3	0,02	0,98	3,7	10,6	0,03	0,97
6	12,5	0,50	9,7	18,0	0,05	0,95	12,7	23,3	0,06	0,94
7	15,0	0,60	19,7	37,7	0,10	0,90	88,7	112,0	0,30	0,70
8	17,5	0,70	64,0	101,7	0,26	0,74	130,7	242,7	0,64	0,36
9	20,0	0,80	106,7	208,4	0,54	0,46	114,0	356,7	0,94	0,06
10	22,5	0,90	112,7	321,1	0,84	0,16	13,7	370,4	0,98	0,02
11	25,0	1,00	40,7	361,8	0,94	0,06	3,7	374,1	0,99	0,01
12	27,5	1,10	11,7	373,5	0,97	0,03	1,7	375,8	0,99	0,01
13	30,0	1,20	3,7	377,2	0,98	0,02	0,7	376,5	1,00	0,00
14	32,5	1,30	2,7	379,9	0,99	0,01	0,7	377,2	1,00	0,00
15	35,0	1,40	2,2	382,1	1,00	0,00	0,5	377,7	1,00	0,00
16	37,5	1,50	1,7	383,8	1,00	0,00	0,5	378,2	1,00	0,00

Análisis de la curva de concentración de trazador para el punto 5:

$$\phi = 0,50 \quad \tan \alpha = 2,1711 \quad T_o = 1.500 \text{ s} \quad t_p = 1.350 \text{ s} \quad t_{10} = 900 \text{ s} \quad t_{50} = 1.178 \text{ s} \quad t_{90} = 1.440 \text{ s}$$

Tiempo en el que aparece el trazador en el efluente :  $t_1 = \phi T_o = 0,50 \times 1.500 = 750 \text{ s}$

Tiempo en que C es mayor que  $C_{max}/2$  :  $t_c = 443 \text{ s}$  Tiempo en que C es mayor que  $C_{max}/10$  :  $t_b = 876 \text{ s}$

Índice de dispersión de Morrill:  $I_M = t_{90} / t_{10} = 1.440 / 900 = 1,60$  Predominio de flujo a pistón

$t_1 / T_o = 750 / 1.500 = 0,50 > 0,30$  Predomina flujo a pistón y no existe tendencia a cortocircuito

$t_m / T_o = 1.178 / 1.500 = 0,79 < 1,00$  Presencia de zonas muertas

$t_p / T_o = 1.350 / 1.500 = 0,90$  Predomina el flujo a pistón.

$t_b / T_o = 876 / 1.500 = 0,58$

$t_c / T_o = 443 / 1.500 = 0,30$  Muy por debajo del valor correspondiente a mezcla completa

Excentricidad de la curva:

$$e = \frac{(t_r - t_p) - (t_p - t_1)}{T_o} = \frac{(2.280 - 1.350) - (1.350 - 750)}{1.500} = 0,22 \quad \text{Flujo a pistón}$$

Funciones de flujo :

$$p = \frac{\phi \tan \alpha}{0,434 + \phi \tan \alpha} = \frac{0,50 \times 2,1711}{0,434 + 0,50 \times 2,1711} = 0,71$$

$$\text{Zonas muertas: } m = 1 - \frac{\phi}{p} = 1 - \frac{0,50}{0,71} = 0,30$$

$$\text{Fracción de flujo a pistón: } p(1 - m) = 0,71 \times (1 - 0,30) = 0,50$$

$$\text{Fracción de flujo mezclado: } (1 - p)(1 - m) = (1 - 0,71)(1 - 0,30) = 0,20$$

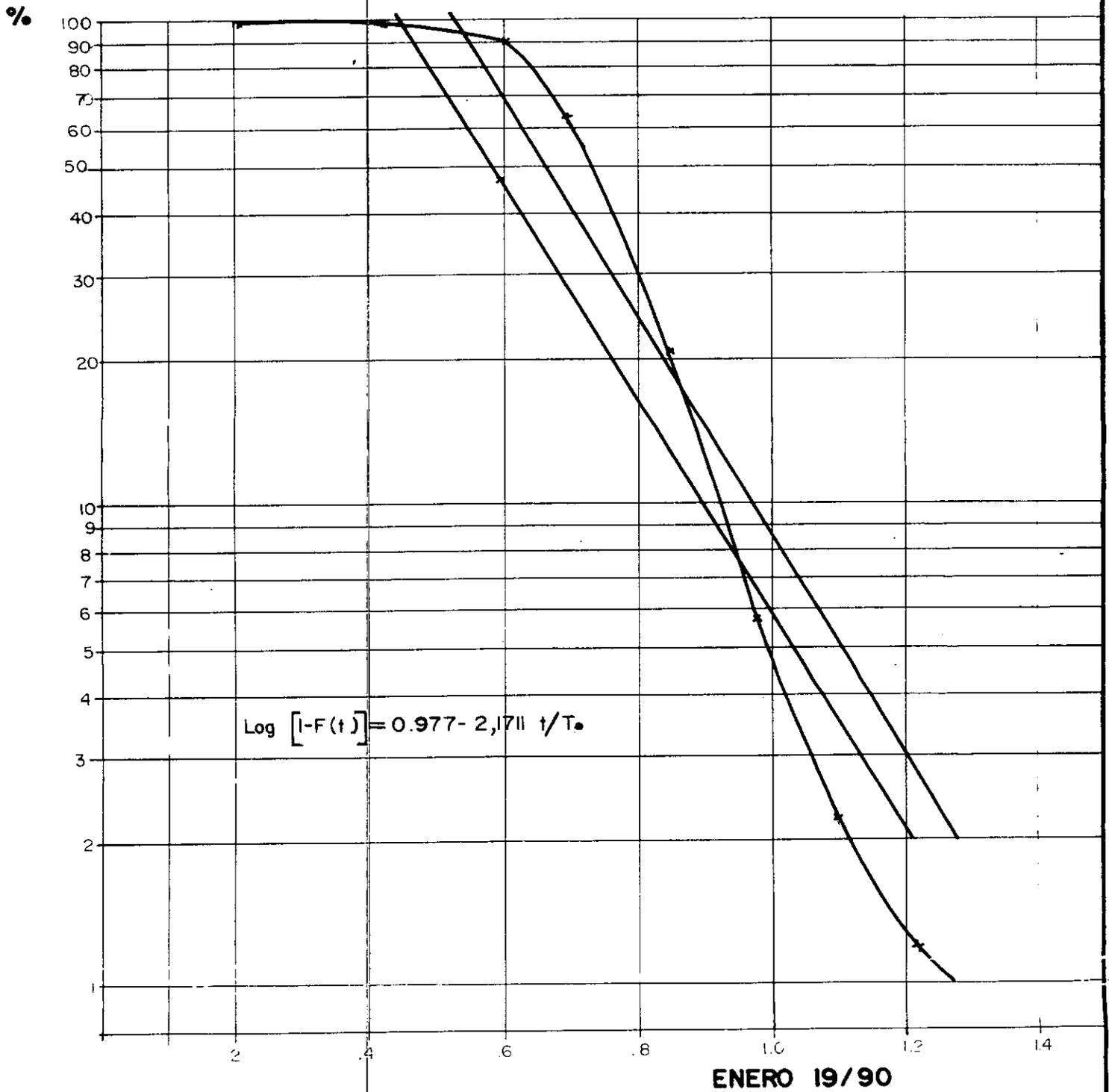
Concentración inicial de cloruros:

$$C_o = \frac{Q \cdot \delta t \cdot \Sigma Cl}{(1 - p)(1 - m)V} = \frac{0,118 \times 60 \times 2,5 \times 383,8}{(1 - 0,71)(1 - 0,30) 184,5} = 181,4$$

Ecuación de la curva de la función  $1 - F(t)$  según el modelo simplificado de Wolf y Resnick :

$$C_t = C_o \left[ \frac{1}{(1 - 0,71)(1 - 0,30)} \left( \frac{t}{1.500} - 0,71(1 - 0,30) \right) - \frac{(t - 750)/300}{1.500} \right] + 22 = C_o \left[ \frac{t}{1.500} - 0,71(1 - 0,30) \right] + 22$$

**FIGURA 45. ENSAYO DE TRAZADORES  
 FLOCURADOR I PLANTA I  
 PUNTO DE MUESTREO 5**



Análisis de la curva de concentración de trazador para el punto 6:

$$\phi = 0,45 \quad \tan \alpha = 2,3533 \quad T_0 = 1.500 \text{ s} \quad t_p = 1.050 \text{ s} \quad t_{10} = 775 \text{ s} \quad t_{90} = 988 \text{ s} \quad t_{99} = 1.180 \text{ s}$$

Tiempo en el que aparece el trazador en el efluente :  $t_1 = \phi T_0 = 0,45 \times 1.500 = 675 \text{ s}$

Tiempo en que C es mayor que  $C_{max}/2$  :  $t_c = 423 \text{ s}$     Tiempo en que C es mayor que  $C_{max}/10$  :  $t_b = 600 \text{ s}$

Índice de dispersión de Morrill:  $I_M = t_{99} / t_{10} = 1.180 / 775 = 1,52$     Predomina el flujo a pistón

$t_1 / T_0 = 675 / 1.500 = 0,45 > 0,30$     Predomina flujo a pistón y no existe tendencia a cortocircuito

$t_m / T_0 = 988 / 1.500 = 0,66 < 1,00$     Presencia de zonas muertas

$t_p / T_0 = 1.050 / 1.500 = 0,70$     Predomina el flujo a pistón.

$t_b / T_0 = 600 / 1.500 = 0,40$

$t_c / T_0 = 423 / 1.500 = 0,28$     Por debajo del valor correspondiente a mezcla completa

Excentricidad de la curva:

$$e = \frac{(t_r - t_p) - (t_p - t_1)}{T_0} = \frac{(1.800 - 1.050) - (1.050 - 675)}{1.500} = 0,25 \quad \text{Flujo a pistón}$$

Funciones de flujo :

$$p = \frac{\phi \tan \alpha}{0,434 + \phi \tan \alpha} = \frac{0,45 \times 2,3533}{0,434 + 0,45 \times 2,3533} = 0,71$$

$$\text{Zonas muertas: } m = 1 - \frac{\phi}{p} = 1 - \frac{0,45}{0,71} = 0,37$$

Fracción de flujo a pistón:  $p (1 - m) = 0,71 \times (1 - 0,37) = 0,45$

Fracción de flujo mezclado:  $(1 - p) (1 - m) = (1 - 0,71) (1 - 0,37) = 0,18$

Concentración inicial de cloruros:

$$C_0 = \frac{Q \cdot \delta t \cdot \Sigma Cl}{(1 - p) (1 - m) V} = \frac{0,113 \times 60 \times 2,5 \times 378,2}{(1 - 0,71) (1 - 0,37) 184,5} = 190,2$$

Ecuación de la curva de la función  $1 - F(t)$  según el modelo simplificado de Wolf y Resnick :

$$C_t = C_0 \cdot e^{-\frac{1}{(1-0,71)(1-0,37)} \left[ \frac{t}{1.500} - 0,71(1-0,37) \right]} - [t - 675,5]/274 + 22 = C_0 \cdot e^{-\dots} + 22$$

**FIGURA 46. ENSAYO DE TRAZADORES  
FLOCURADOR I PLANTA I  
PUNTO DE MUESTREO 6**

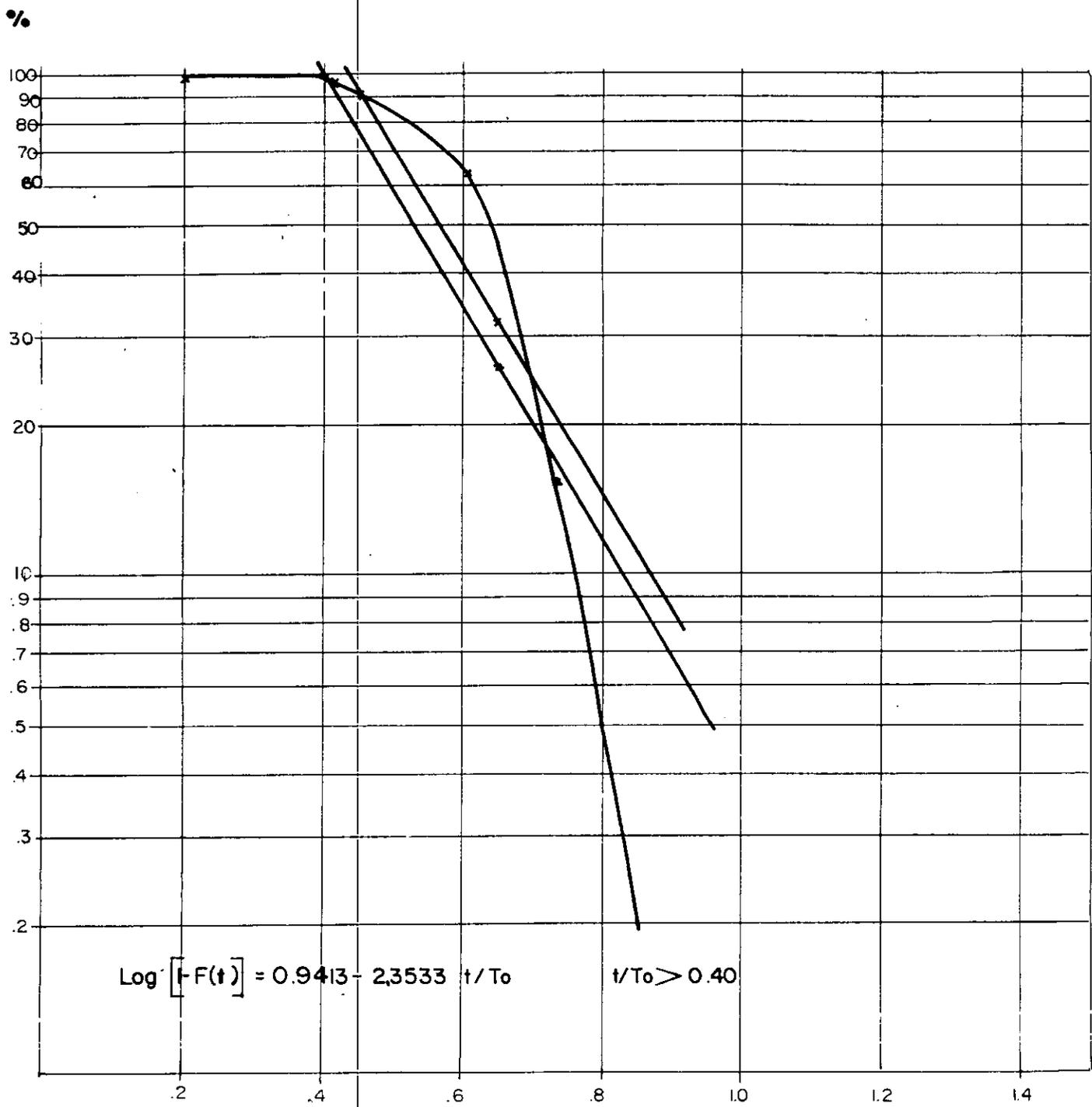
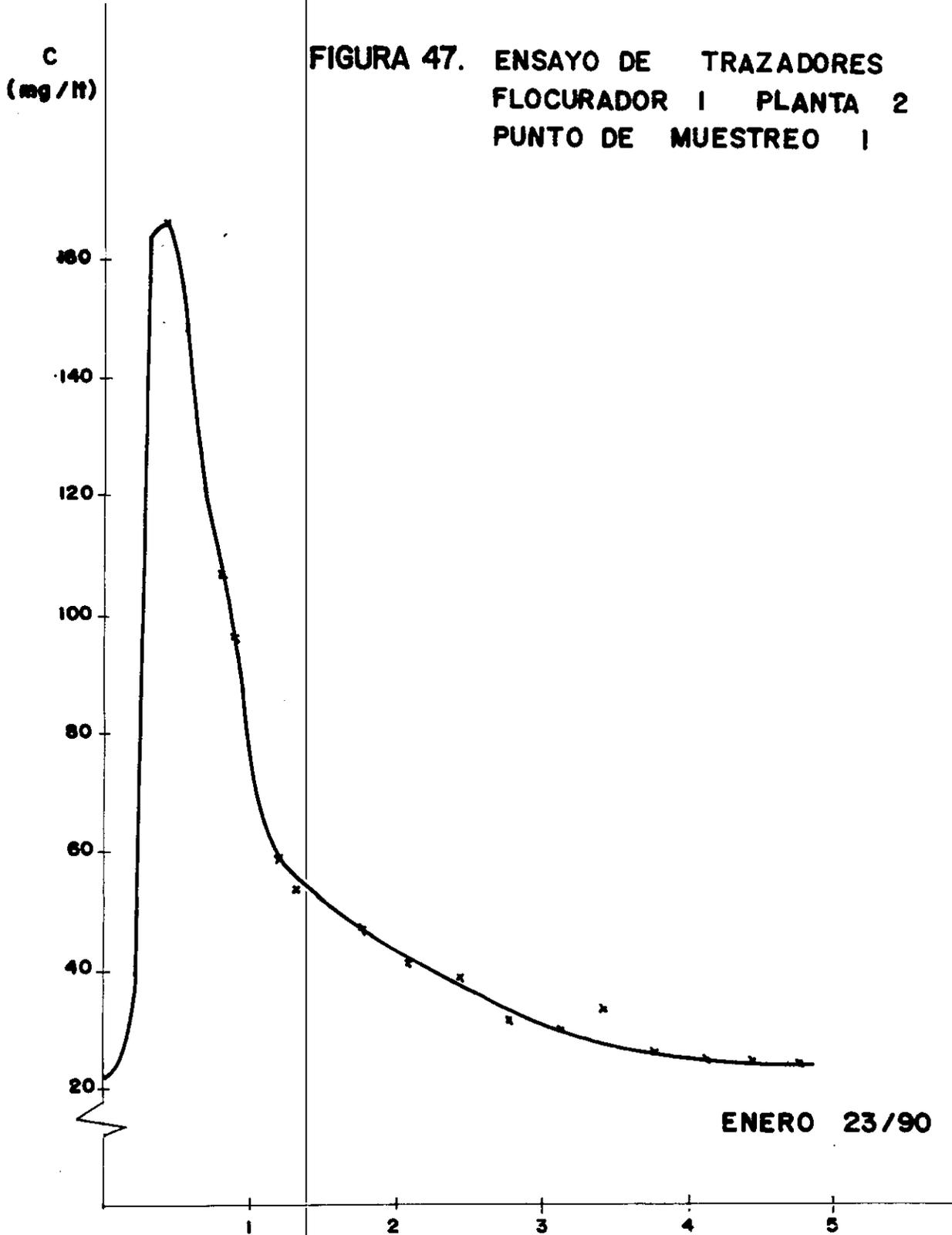




FIGURA 47. ENSAYO DE TRAZADORES  
FLOCURADOR 1 PLANTA 2  
PUNTO DE MUESTREO 1



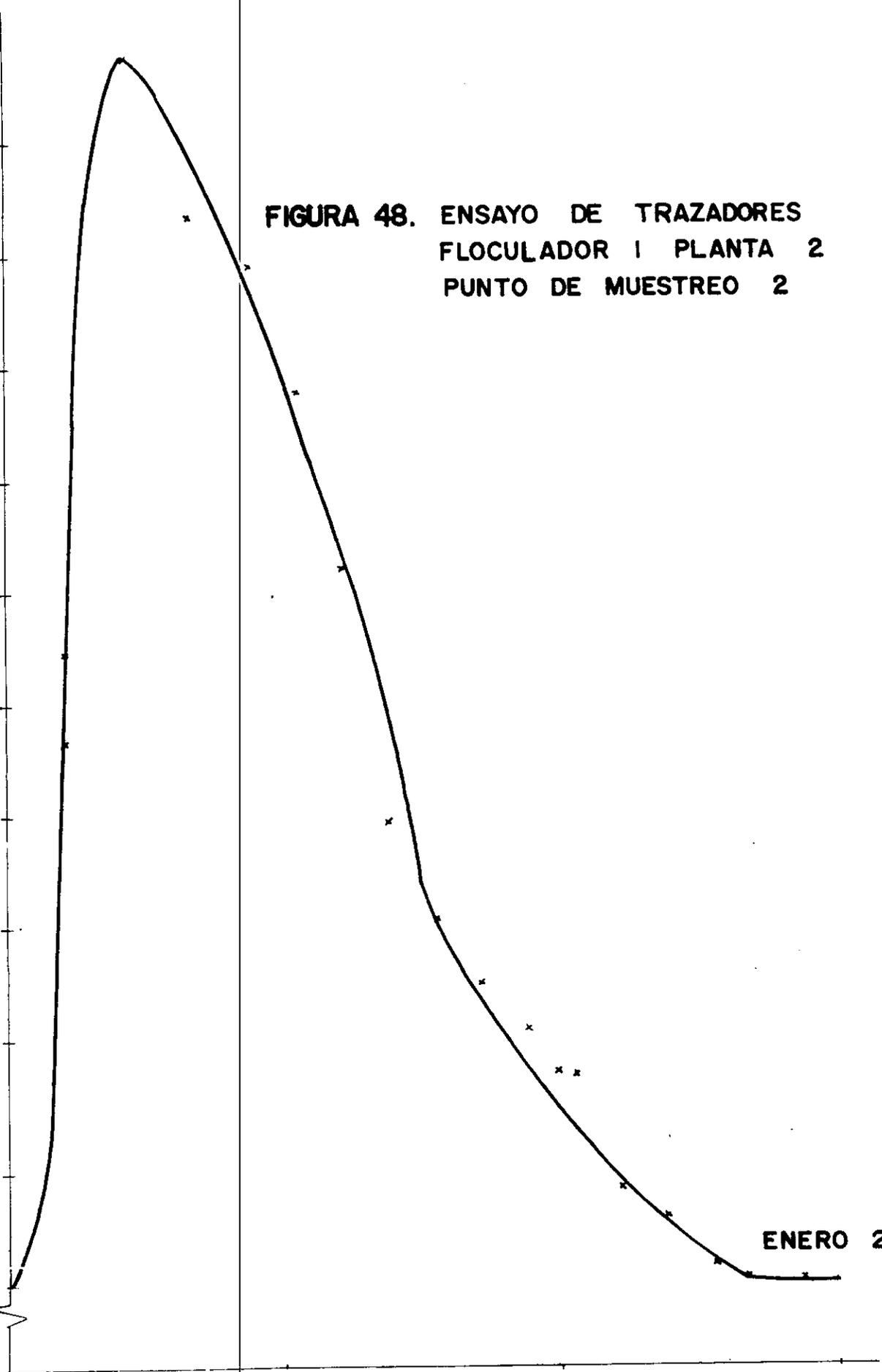
C  
(mg/l)

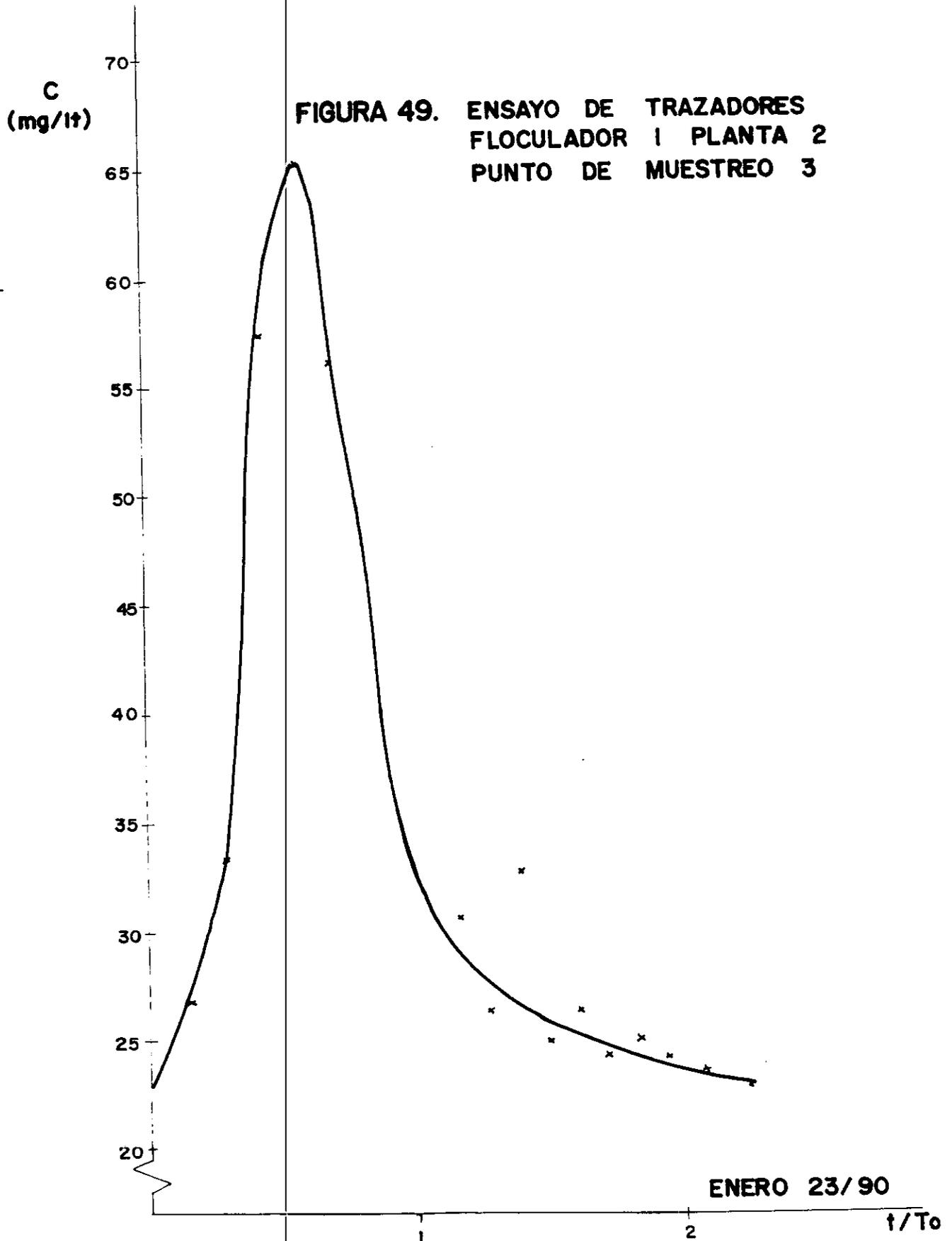
75  
70  
65  
60  
55  
50  
45  
40  
35  
30  
24

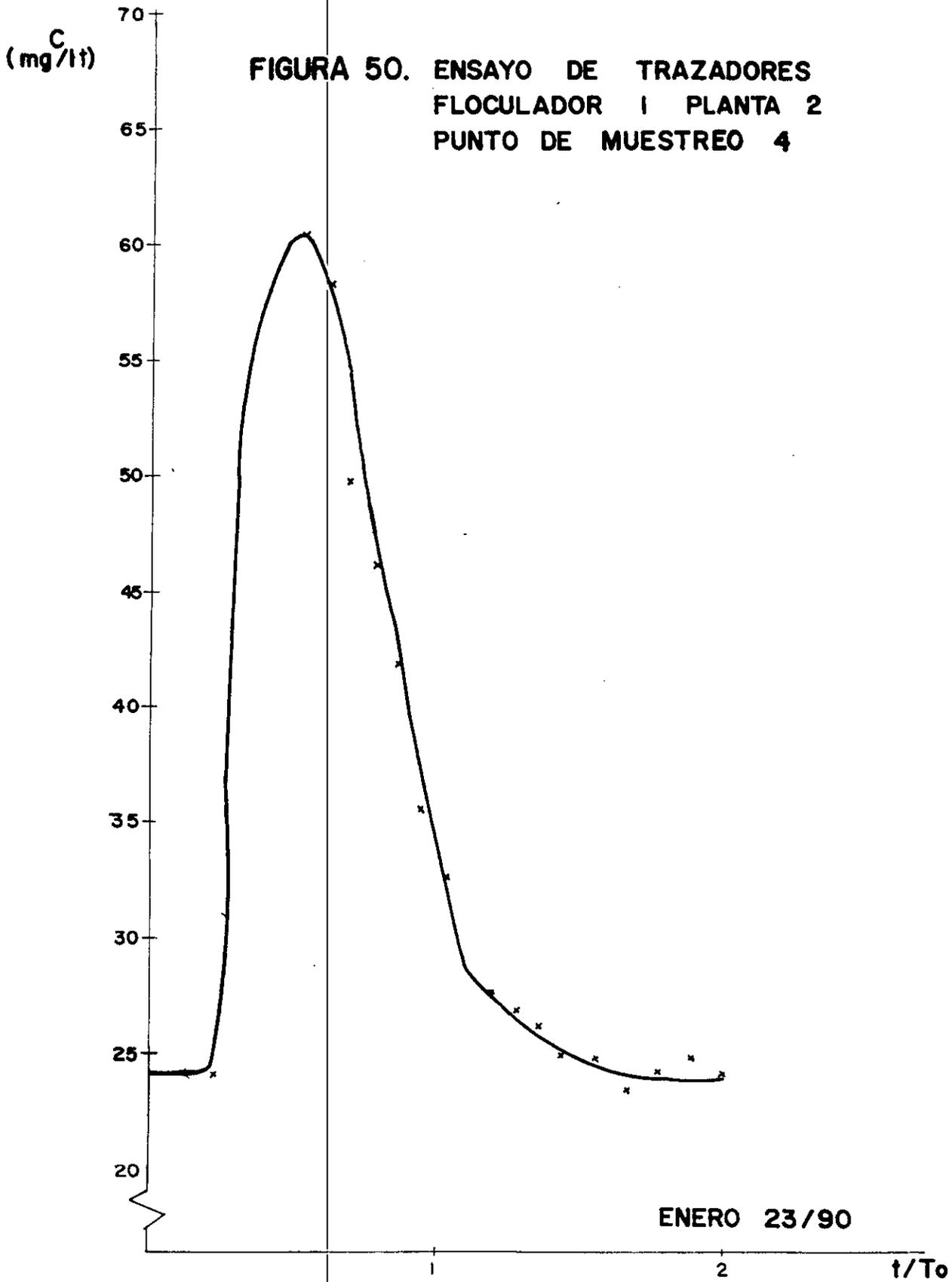
**FIGURA 48. ENSAYO DE TRAZADORES  
FLOCULADOR 1 PLANTA 2  
PUNTO DE MUESTREO 2**

**ENERO 23/90**

1 2 3







**TABLA 62.** Resultados de ensayo de trazadores - Unidad de Floculación uno. - Planta dos. - Ene 23/90.

Número de orden	t min	PUNTO 1				PUNTO 2			
		t/T <sub>0</sub>	C - C <sub>0</sub>	Σ(C-C <sub>0</sub> )	1-F(t)	t/T <sub>0</sub>	C - C <sub>0</sub>	Σ(C-C <sub>0</sub> )	1-F(t)
1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,00	0,0	0,0	0,0	1,00
2	1,8	0,2	7,4	7,4	0,99	0,1	2,4	2,4	1,00
3	3,6	0,4	141,9	149,3	0,75	0,2	15,9	18,3	0,97
4	5,4	0,6	115,9	265,2	0,56	0,3	45,9	64,2	0,90
5	7,2	0,8	83,9	349,1	0,42	0,4	53,9	118,1	0,81
6	9,0	1,0	51,9	401,0	0,33	0,5	53,9	172,0	0,72
7	10,8	1,2	35,9	436,9	0,27	0,6	51,9	223,9	0,64
8	12,6	1,4	29,4	466,3	0,22	0,7	49,4	273,3	0,56
9	14,4	1,6	24,4	490,7	0,18	0,8	46,7	320,0	0,48
10	16,2	1,8	22,4	513,1	0,14	0,9	43,9	363,9	0,41
11	18,0	2,0	18,9	532,0	0,11	1,0	39,9	403,8	0,35
12	19,8	2,2	15,9	547,9	0,08	1,1	36,9	440,7	0,29
13	21,6	2,4	13,4	561,3	0,06	1,2	33,4	474,1	0,24
14	23,4	2,6	10,4	571,7	0,04	1,3	29,4	503,5	0,19
15	25,2	2,8	8,4	580,1	0,03	1,4	24,4	527,9	0,15
16	27,0	3,0	5,9	586,0	0,02	1,5	18,6	546,5	0,12
17	28,8	3,2	4,4	590,4	0,01	1,6	14,9	561,4	0,10
18	30,6	3,4	3,4	593,8	0,01	1,7	12,9	574,3	0,08
19	32,4	3,6	1,9	595,7	0,00	1,8	11,2	585,5	0,06
20	34,2	3,8	0,9	596,6	0,00	1,9	9,4	594,9	0,04
21	36,0	4,0	0,7	597,3	0,00	2,0	7,7	602,6	0,03
22	37,8					2,1	6,2	608,8	0,02
23	39,6					2,2	4,7	613,5	0,01
24	41,4					2,3	3,4	616,9	0,01
25	43,2					2,4	2,4	619,3	0,00
26	45,0					2,5	1,3	620,6	0,00
27	46,8					2,6	0,4	621,0	0,00
28	48,6					2,7	0,0	621,0	0,00

Análisis de la curva de concentración de trazador para el punto 1:

$$\phi = 0,20 \quad \tan \alpha = 0,5234 \quad T_0 = 540 \text{ s} \quad t_p = 216 \text{ s} \quad t_{10} = 149 \text{ s} \quad t_{90} = 370 \text{ s} \quad t_{90} = 1.116 \text{ s}$$

Tiempo en el que aparece el trazador en el efluente :  $t_1 = \phi T_0 = 0,20 \times 540 = 108 \text{ s}$

Tiempo en que C es mayor que  $C_{max}/2$  :  $t_c = 317 \text{ s}$     Tiempo en que C es mayor que  $C_{max}/10$  :  $t_b = 1.148 \text{ s}$

Índice de dispersión de Morrill:  $I_M = t_{90} / t_{10} = 1.116 / 149 = 7,49$     Predomina el flujo mezclado

$t_1 / T_0 = 108 / 540 = 0,20 < 0,30$     Predomina flujo mezclado y existe tendencia a cortocircuito

$t_m / T_0 = 370 / 540 = 0,69 < 1,00$     Presencia de zonas muertas

$t_p / T_0 = 216 / 540 = 0,40$     Predomina el flujo mezclado

$t_c / T_0 = 317 / 540 = 0,59$

$t_b / T_0 = 1.180 / 540 = 2,19$     Muy cercano al valor correspondiente a mezcla completa

Excentricidad de la curva:

$$e = \frac{(t_c - t_p) - (t_p - t_1)}{T_0} = \frac{(1.440 - 216) - (216 - 108)}{540} = 2,07 \quad \text{Flujo mezclado}$$

Funciones de flujo :

$$p = \frac{\phi \tan \alpha}{0,434 + \phi \tan \alpha} = \frac{0,20 \times 0,5234}{0,434 + 0,20 \times 0,5234} = 0,19$$

$$\text{Zonas muertas: } m = 1 - \frac{\phi}{p} = 1 - \frac{0,20}{0,19} = -0,05$$

Fración de flujo a pistón:  $p (1 - m) = 0,19 \times (1 + 0,05) = 0,20$

Fración de flujo mezclado:  $(1 - p) (1 - m) = (1 - 0,19) (1 + 0,05) = 0,85$

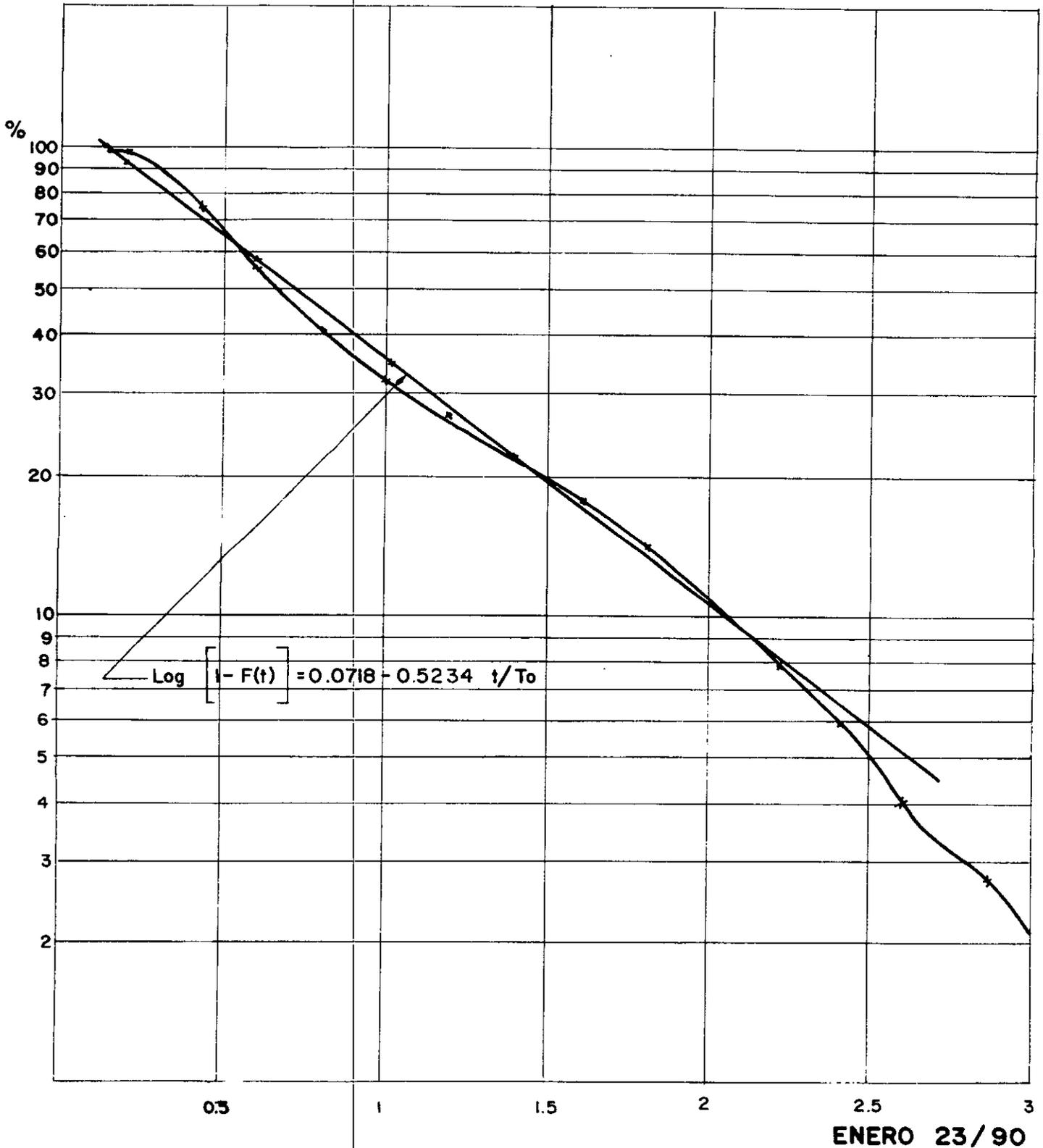
Concentración inicial de cloruros:

$$C_0 = \frac{Q \cdot \delta t \cdot \text{Cl}}{(1 - p) (1 - m) V} = \frac{0,214 \times 60 \times 1,8 \times 597,3}{(1 - 0,19) (1 + 0,05) 116,65} = 139,2$$

Ecuación de la curva de la función  $1 - F(t)$  según el modelo simplificado de Wolf y Resnick :

$$C_t = C_0 \left[ \frac{1}{(1 - 0,19)(1 + 0,05)} \left( \frac{t}{540} - 0,19(1 + 0,05) \right) - \frac{(t - 108)/437}{+ 22} \right] = C_0 \left[ \dots \right] + 22$$

FIGURA 51. ENSAYO DE TRAZADORES  
 FLOCULADOR 1 PLANTA 2  
 PUNTO DE MUESTREO 1



Análisis de la curva de concentración de trazador para el punto 2:

$$\phi = 0,20 \quad \tan \alpha = 0,7186 \quad T_0 = 1.080 \text{ s} \quad t_p = 486 \text{ s} \quad t_{10} = 324 \text{ s} \quad t_{50} = 837 \text{ s} \quad t_{90} = 1.728 \text{ s}$$

Tiempo en el que aparece el trazador en el efluente :  $t_1 = \phi T_0 = 0,20 \times 1.080 = 216 \text{ s}$

Tiempo en que C es mayor que  $C_{max}/2$ :  $t_c = 1.172 \text{ s}$     Tiempo en que C es mayor que  $C_{max}/10$ :  $t_b = 1.119 \text{ s}$

Índice de dispersión de Morrill:  $I_M = t_{90} / t_{10} = 1.728 / 324 = 5,33$     Flujo mezclado

$t_1 / T_0 = 216 / 1.080 = 0,20 < 0,30$     Predomina flujo mezclado y existe tendencia a cortocircuito

$t_m / T_0 = 837 / 1.080 = 0,78 < 1,00$     Indica presencia de zonas muertas

$t_p / T_0 = 486 / 1.080 = 0,45$     Predomina el flujo mezclado

$t_c / T_0 = 1.172 / 1.080 = 1,09$

$t_b / T_0 = 1.119 / 1.080 = 1,04$

Excentricidad de la curva:

$$e = \frac{(t_r - t_p) - (t_p - t_1)}{T_0} = \frac{(2.040 - 486) - (486 - 216)}{1.080} = 1,19$$

Funciones de flujo :

$$p = \frac{\phi \tan \alpha}{0,434 + \phi \tan \alpha} = \frac{0,20 \times 0,7186}{0,434 + 0,20 \times 0,7186} = 0,25$$

Zonas muertas:  $m = 1 - \frac{\phi}{p} = 1 - \frac{0,20}{0,25} = 0,20$

Fración de flujo a pistón:  $p (1 - m) = 0,25 \times (1 - 0,20) = 0,20$

Fración de flujo mezclado:  $(1 - p) (1 - m) = (1 - 0,25) (1 - 0,20) = 0,60$

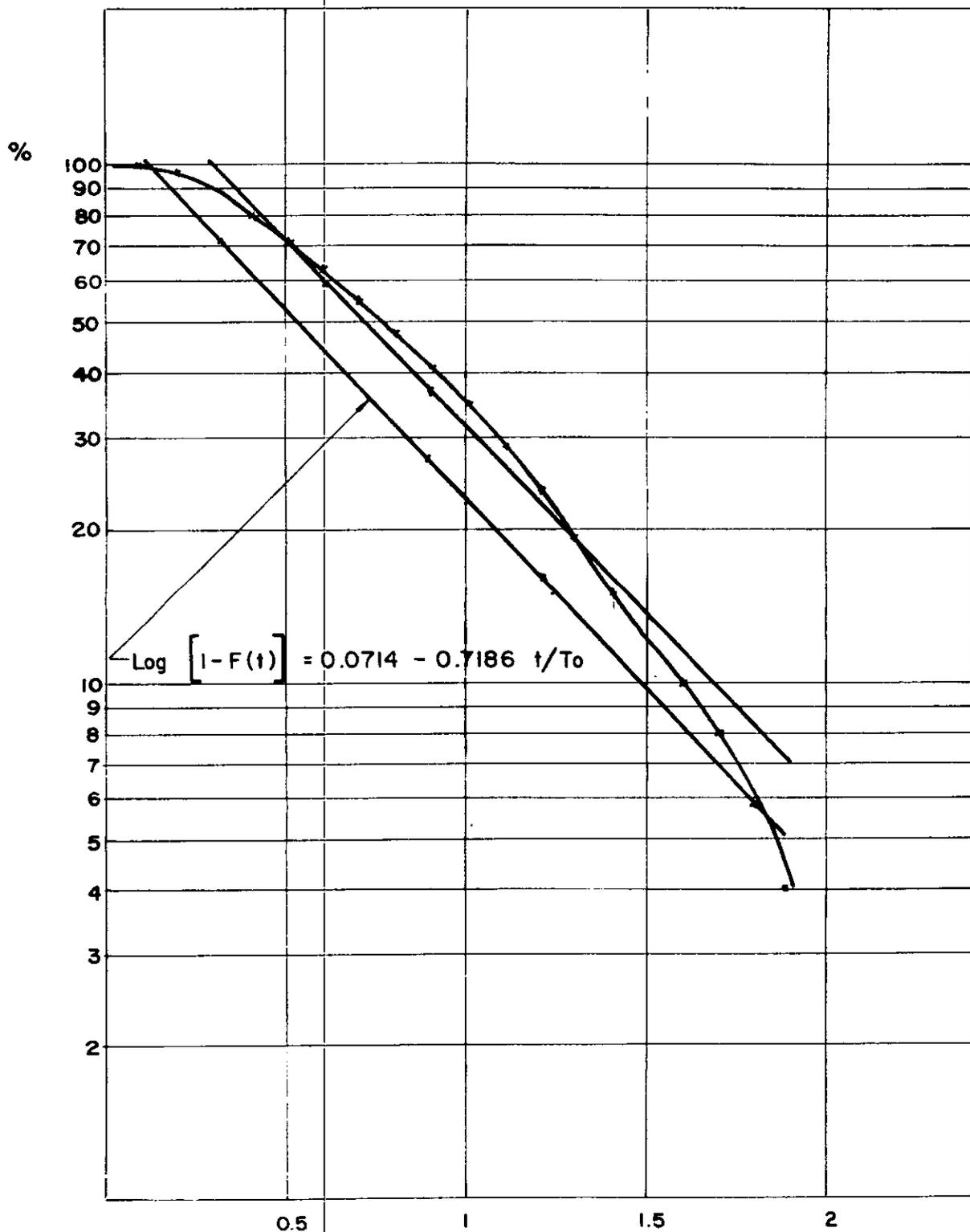
Concentración inicial de cloruros:

$$C_0 = \frac{Q \cdot \delta t \cdot \Sigma Cl}{(1 - p) (1 - m) V} = \frac{0,214 \times 60 \times 1,8 \times 621,0}{(1 - 0,25) (1 - 0,20) 233,3} = 102,5$$

Ecuación de la curva de la función  $1 - F(t)$  según el modelo simplificado de Wolf y Resnick :

$$C_t = C_0 \cdot e^{-\frac{t}{1.080} \left[ \frac{1}{(1-0,25)(1-0,20)} - 0,25(1-0,20) \right]} - \frac{t}{1.080} - \frac{216}{1.080} + 22 = C_0 \cdot e^{-\frac{t}{1.080} \left[ \frac{1}{(1-0,25)(1-0,20)} - 0,25(1-0,20) \right]} + 22$$

FIGURA 52. ENSAYO DE TRAZADORES  
FLOCULADOR 1 PLANTA 2  
PUNTO DE MUESTREO 2



ENERO 23/90

**TABLA 63.** Resultados de ensayo de trazadores - Unidad de Floculación uno. - Planta dos. - Enero 23 de 1990.

		PUNTO 3			
Número de orden	t min	t/T <sub>0</sub>	C - C <sub>0</sub>	Σ(C-C <sub>0</sub> )	1-F(t)
1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,00
2	2,7	0,1	0,9	0,9	1,00
3	5,4	0,2	4,7	5,6	0,97
4	8,1	0,3	9,4	15,0	0,93
5	10,8	0,4	29,9	44,9	0,80
6	13,5	0,5	38,4	83,3	0,62
7	16,2	0,6	41,4	124,7	0,44
8	18,9	0,7	32,9	157,6	0,29
9	21,6	0,8	24,4	182,0	0,18
10	24,3	0,9	14,9	196,9	0,11
11	27,0	1,0	8,4	205,3	0,08
12	29,7	1,1	5,9	211,2	0,05
13	32,4	1,2	4,2	215,4	0,03
14	35,1	1,3	2,9	218,3	0,02
15	37,8	1,4	2,2	220,5	0,01
16	40,5	1,5	0,9	221,4	0,00
17	43,2	1,6	0,5	221,9	0,00
18	45,9	1,7	0,2	222,1	0,00
19	48,6	1,8	0,0	222,1	0,00
20	51,3	1,9	0,0	222,1	0,00
21	54,0	2,0	0,0	222,1	0,00

Análisis de la curva de concentración de trazador para el punto 3:

$$\phi = 0,25 \quad \tan \alpha = 1,755 \quad T_0 = 1.620 \text{ s} \quad t_p = 972 \text{ s} \quad t_{10} = 523 \text{ s} \quad t_{90} = 918 \text{ s} \quad t_{90} = 1.458 \text{ s}$$

Tiempo en el que aparece el trazador en el efluente :  $t_1 = \phi T_0 = 0,25 \times 1.620 = 405 \text{ s}$

Tiempo en que C es mayor que  $C_{max}/2$  :  $t_c = 776 \text{ s}$     Tiempo en que C es mayor que  $C_{max}/10$  :  $t_b = 1.620 \text{ s}$

Índice de dispersión de Morrill:  $I_M = t_{90} / t_{10} = 1.458 / 523 = 2,79$     Flujo combinado

$t_1 / T_0 = 405 / 1.620 = 0,25 < 0,30$     Predomina flujo a pistón y existe tendencia a cortocircuito

$t_m / T_0 = 918 / 1.620 = 0,57 < 1,00$     Presencia de zonas muertas

$t_p / T_0 = 972 / 1.620 = 0,60$     Predomina el flujo a pistón.

$t_c / T_0 = 776 / 1.620 = 0,48$

$t_b / T_0 = 1.620 / 1.620 = 1,00$

Excentricidad de la curva:

$$e = \frac{(t_r - t_p) - (t_p - t_1)}{T_0} = \frac{(1.740 - 972) - (972 - 405)}{1.620} = 0,12$$

Funciones de flujo :

$$p = \frac{\phi \tan \alpha}{0,434 + \phi \tan \alpha} = \frac{0,25 \times 1,755}{0,434 + 0,25 \times 1,755} = 0,50$$

$$\text{Zonas muertas: } m = 1 - \frac{\phi}{p} = 1 - \frac{0,25}{0,50} = 0,50$$

Fración de flujo a pistón:  $p (1 - m) = 0,50 \times (1 - 0,50) = 0,25$

Fración de flujo mezclado:  $(1 - p) (1 - m) = (1 - 0,50) (1 - 0,50) = 0,25$

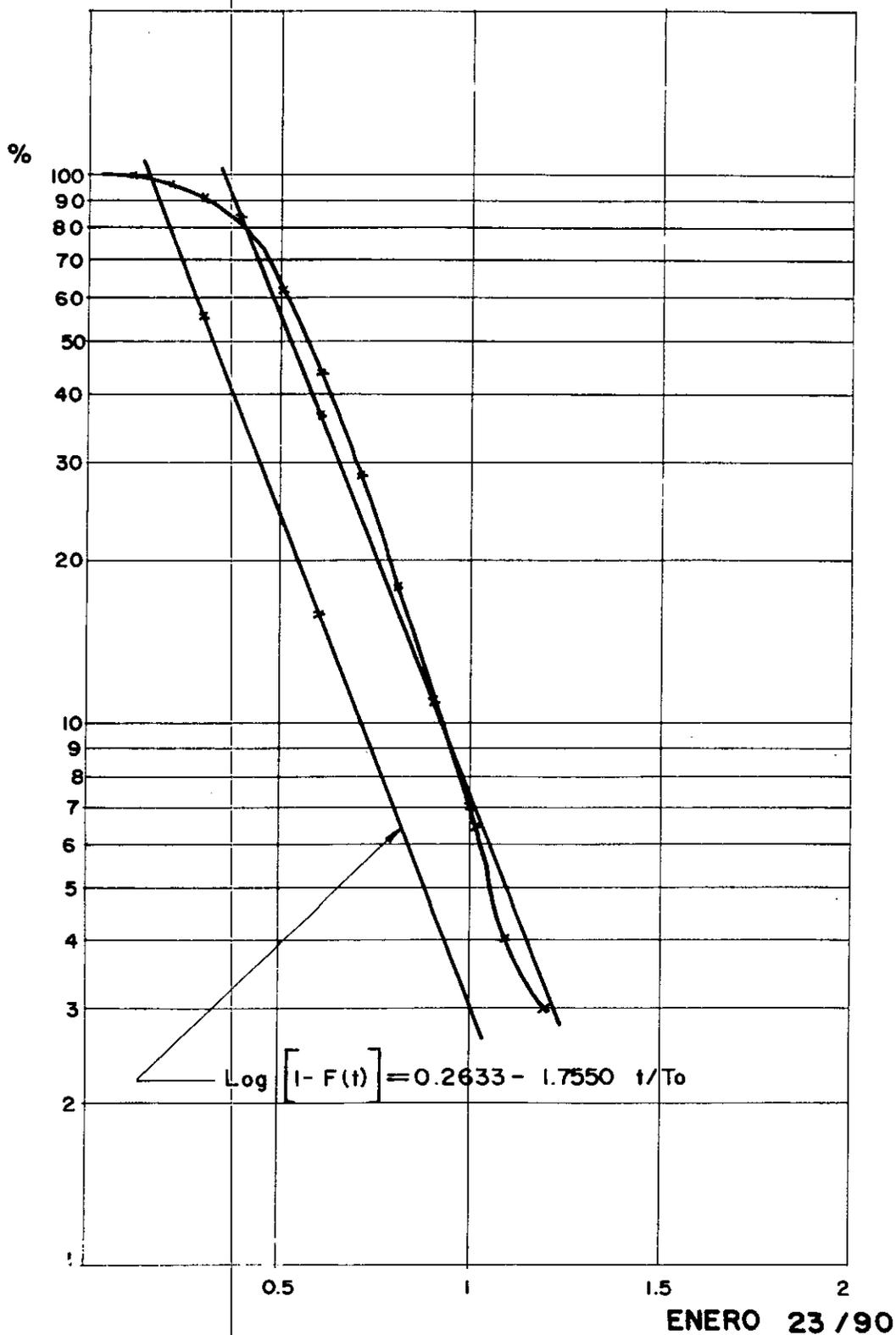
Concentración inicial de cloruros:

$$C_0 = \frac{Q \cdot \delta t \cdot \Sigma Cl}{(1 - p) (1 - m) V} = \frac{0,214 \times 60 \times 2,7 \times 222,1}{(1 - 0,50) (1 - 0,50) 350,0} = 88,0$$

Ecuación de la curva de la función  $1 - F(t)$  según el modelo simplificado de Wolf y Resnick :

$$C_t = C_0 \left[ \frac{1}{(1 - 0,50)(1 - 0,50)} \left( \frac{t}{1.620} - 0,50(1 - 0,50) \right) - \frac{(t - 405)/405}{1.620} \right] + 22 = C_0 \left[ \frac{t}{1.620} - 0,25 \right] + 22$$

FIGURA 53. ENSAYO DE TRAZADORES  
 FLOCULADOR 1 PLANTA 2  
 PUNTO DE MUESTREO 3



**TABLA 64.** Resultados de ensayo de trazadores - Unidad de Floculación uno. - Planta dos. - Enero 23 de 1990.

PUNTO 4					
Número de orden	t min	t/T <sub>0</sub>	C - C <sub>0</sub>	Σ(C-C <sub>0</sub> )	1-F(t)
1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,00
2	3,6	0,1	0,0	0,0	1,00
3	7,2	0,2	0,0	0,0	1,00
4	10,8	0,3	22,9	22,9	0,89
5	14,4	0,4	33,4	56,3	0,74
6	18,0	0,5	36,4	92,7	0,57
7	21,6	0,6	34,9	127,6	0,41
8	25,2	0,7	28,4	156,0	0,27
9	28,8	0,8	21,6	177,6	0,17
10	32,4	0,9	14,9	192,5	0,10
11	36,0	1,0	9,4	201,9	0,06
12	39,6	1,1	4,4	206,3	0,04
13	43,2	1,2	3,4	209,7	0,02
14	46,8	1,3	2,4	212,1	0,01
15	50,4	1,4	1,4	213,5	0,01
16	54,0	1,5	0,7	214,2	0,00
17	57,6	1,6	0,4	214,6	0,00
18	61,2	1,7	0,0	214,6	0,00
19	64,8	1,8	0,0	214,6	0,00
20	68,4	1,9			
21	72,0				

Análisis de la curva de concentración de trazador para el punto 4:

$$\phi = 0,25 \quad \tan \alpha = 1,7027 \quad T_0 = 2.160 \text{ s} \quad t_p = 1.080 \text{ s} \quad t_{10} = 648 \text{ s} \quad t_{90} = 1.175 \text{ s} \quad t_{95} = 1.944 \text{ s}$$

Tiempo en el que aparece el trazador en el efluente :  $t_1 = \phi T_0 = 0,25 \times 2.160 = 540 \text{ s}$

Tiempo en que C es mayor que  $C_{max}/2$  :  $t_c = 1.234 \text{ s}$     Tiempo en que C es mayor que  $C_{max}/10$  :  $t_b = 2.074 \text{ s}$

Índice de dispersión de Morrill:  $I_M = t_{90} / t_{10} = 1.944 / 648 = 3,0$     Flujo combinado

$t_1 / T_0 = 540 / 2.160 = 0,25 < 0,30$     Predomina flujo a pistón y existe tendencia a cortocircuito

$t_m / T_0 = 1.175 / 2.160 = 0,54 < 1,00$     Presencia de zonas muertas

$t_p / T_0 = 1.080 / 2.160 = 0,50$     Predomina el flujo combinado

$t_b / T_0 = 2.074 / 2.160 = 0,96$

$t_c / T_0 = 1.234 / 2.160 = 0,57$

Excentricidad de la curva:

$$e = \frac{(t_r - t_p) - (t_p - t_1)}{T_0} = \frac{(3.240 - 1.080) - (1.080 - 540)}{2.160} = 0,75$$

Funciones de flujo :

$$p = \frac{\phi \tan \alpha}{0,434 + \phi \tan \alpha} = \frac{0,25 \times 1,7027}{0,434 + 0,25 \times 1,7027} = 0,50$$

$$\text{Zonas muertas: } m = 1 - \frac{\phi}{p} = 1 - \frac{0,25}{0,50} = 0,50$$

Fración de flujo a pistón:  $p (1 - m) = 0,50 \times (1 - 0,50) = 0,25$

Fración de flujo mezclado:  $(1 - p) (1 - m) = (1 - 0,50) (1 - 0,50) = 0,25$

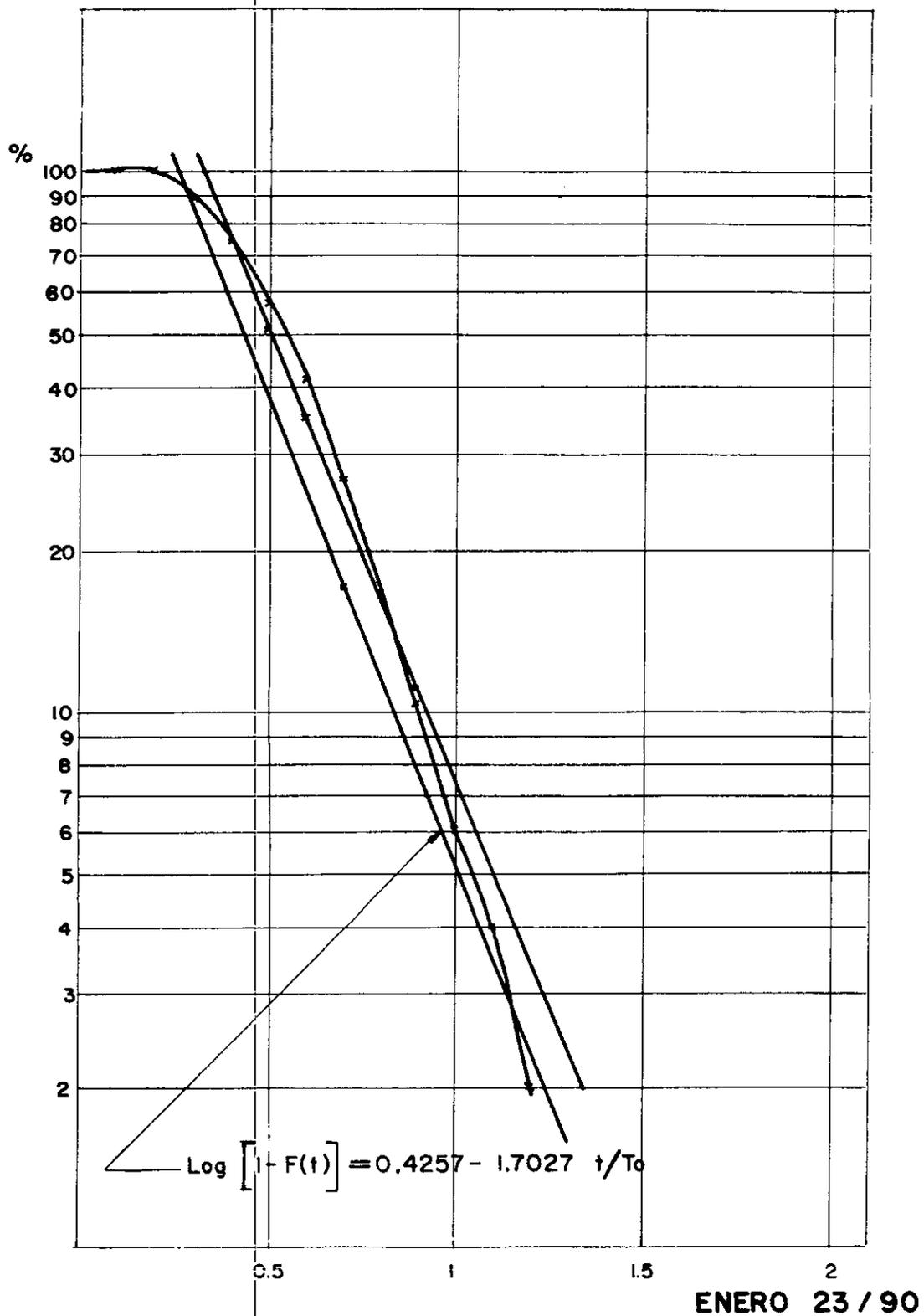
Concentración inicial de cloruros:

$$C_0 = \frac{Q \cdot \delta t \cdot \text{ECI}}{(1 - p) (1 - m) V} = \frac{0,214 \times 60 \times 3,6 \times 214,6}{(1 - 0,50) (1 - 0,50) 466,6} = 85,0$$

Ecuación de la curva de la función  $1 - F(t)$  según el modelo simplificado de Wolf y Resnick :

$$C_t = C_0 \left[ \frac{1}{(1 - 0,50)(1 - 0,50)} \left( \frac{t}{2.160} - 0,50(1 - 0,50) \right) - (t - 540)/540 \right] + 22 = C_0 \left[ \dots \right] + 22$$

FIGURA 54. ENSAYO DE TRAZADORES  
FLOCULADOR 1 PLANTA 2  
PUNTO DE MUESTREO 4



### 5.3 EVALUACION DEL PROCESO DE SEDIMENTACION.

Cumplido el proceso de desestabilización de las partículas coloidales durante la coagulación y su posterior aglutinamiento durante la floculación sigue el proceso de separar los sólidos del líquido. Esto puede conseguirse por sedimentación o filtración del agua, siendo lo más común usar ambos procedimientos de forma que sean complementarios.

Por la sedimentación se logra la remoción de las partículas más densas que el agua y que tienen una velocidad de caída suficiente para llegar al fondo del tanque sedimentador en un tiempo económicamente aceptable.

Fundamentalmente existen dos enfoques para explicar la teoría de sedimentación: el de las partículas discretas y el de las partículas floculentas.

El primero, sedimentación de partículas discretas, explica un proceso ideal de remoción de partículas, sin tener en cuenta que las mismas van ganando peso en su caída al encontrar otras más livianas. Resultan así velocidades de sedimentación constantes.

Por el contrario la velocidad de sedimentación de

partículas flocculentas depende de las características de la suspensión, de las características hidráulicas del sedimentador, influencia de turbulencias y cambios de gradiente, variables éstas que no hacen posible el uso de un modelo matemático general.

Al intentar evaluar el proceso de sedimentación debemos tener presente que debido a la baja velocidad con que transita el líquido, el flujo en los sedimentadores es inestable. Esto implica que el análisis de su comportamiento deba hacerse a través del tiempo, y será tan ajustado a la realidad como sólidos sean los registros llevados.

Los ensayos realizados se orientaron a tres aspectos generales a saber:

19. Determinación de la eficiencia de los sedimentadores en función de parámetros tales como la calidad del agua cruda, la sedimentada, la carga superficial y el pretratamiento.

20. Determinación de las condiciones hidráulicas: caracterización del flujo, tiempo real de detención, carga superficial real, número de Reynolds y número de Froude.

30. Caracterización de cada una de las partes componentes de los tanques de sedimentación: zona de entrada, depósito de lodos y zona de salida.

**5.3.1 Determinación de la eficiencia.** Con base en datos de operación de la planta y a registros estadísticos llevados en la planta, se determina la eficiencia del proceso de sedimentación en función de los siguientes variables:

- La calidad del agua cruda.
- La calidad del agua sedimentada.
- La carga superficial.
- El pretratamiento.

**5.3.1.1 En función de la calidad del agua cruda.** La eficiencia del sedimentador para remover las partículas en el agua depende de las características tanto del agua cruda como de las partículas que contiene. Es de esperar que la eficiencia se incremente con el mayor contenido de partículas en suspensión, hasta llegar a un valor límite. Después de este valor se presentará la disminución de la velocidad de asentamiento por la gran concentración de partículas cayendo independientemente. Cuando esto último se produce se habla de sedimentación autointerferida o interferida y la eficiencia del sedimentador será baja.

Para determinar la correlación entre la calidad del agua cruda y la que produce el sedimentador, se procede así:

- Se toman los reportes de operación de las plantas a evaluar y los resultados de los ensayos de tratabilidad hechos diariamente en el laboratorio, correspondientes al periodo Enero a Diciembre de 1989. (Tabla 65).

- Se agrupan en rangos predeterminados los datos de turbiedad del agua cruda y sus correspondientes de agua sedimentada en la planta para el período a evaluar.

- Se dibujan estos puntos sobre papel semilogarítmico y se encuentra la ecuación de la recta de mejor ajuste, por el procedimiento de mínimos cuadrados. La variable independiente será la correspondiente al agua sedimentada y la dependiente la del agua cruda. (Figuras 55 y 56).

- Se arreglan los datos tomados en el laboratorio en forma similar, se dibujan y se determina la ecuación de la recta de mejor ajuste. (Figuras 55 y 56).

Se determina la eficiencia de la unidad como el porcentaje que representa la diferencia entre la turbiedades del agua sedimentada en la planta y en el ensayo de jarras y referida a este último valor.

**TABLA 65.** Correlación entre turbiedades del agua cruda y del agua sedimentada. Plantas uno y dos.

Turbiedad de agua cruda (U.N.T.)		Valor medio de turbiedad de agua sedimentada (U.N.T.)	
Rango	Valor medio	En Planta 1	En Planta 2
0 - 9,9	5	2,4	2,5
10 - 19,9	15	3,0	3,3
20 - 29,9	25	3,3	3,9
30 - 39,9	35	4,2	4,4
40 - 49,9	45	3,6	4,6
50 - 59,9	55	3,6	5,1
60 - 69,9	65	5,5	6,2
70 - 79,9	75	5,8	6,6
80 - 89,9	85	6,2	7,1
90 - 99,9	95		
100 - 109,9	105		
110 - 119,9	115		8,5
120 - 129,9	125		
130 - 139,9	135	7,1	12,5
140 - 149,9	145	7,5	15,0
150 - 159,9	155		
160 - 169,9	165		
170 - 179,9	175		
180 - 189,9	185	14,0	

**FIGURA 55. EFICIENCIA DEL PROCESO DE SEDIMENTACION EN FUNCION DEL AGUA CRUDA PLANTA I**

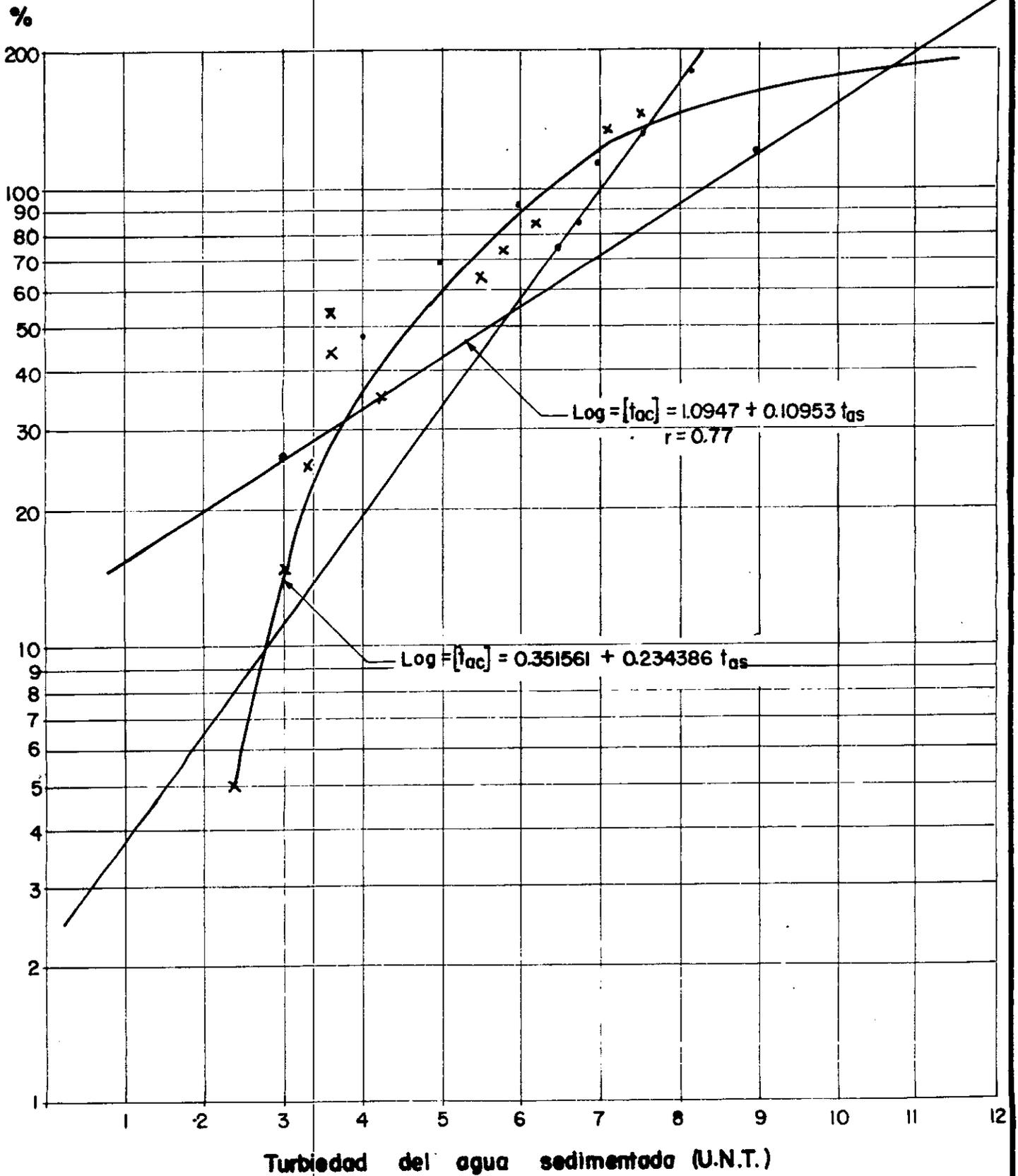
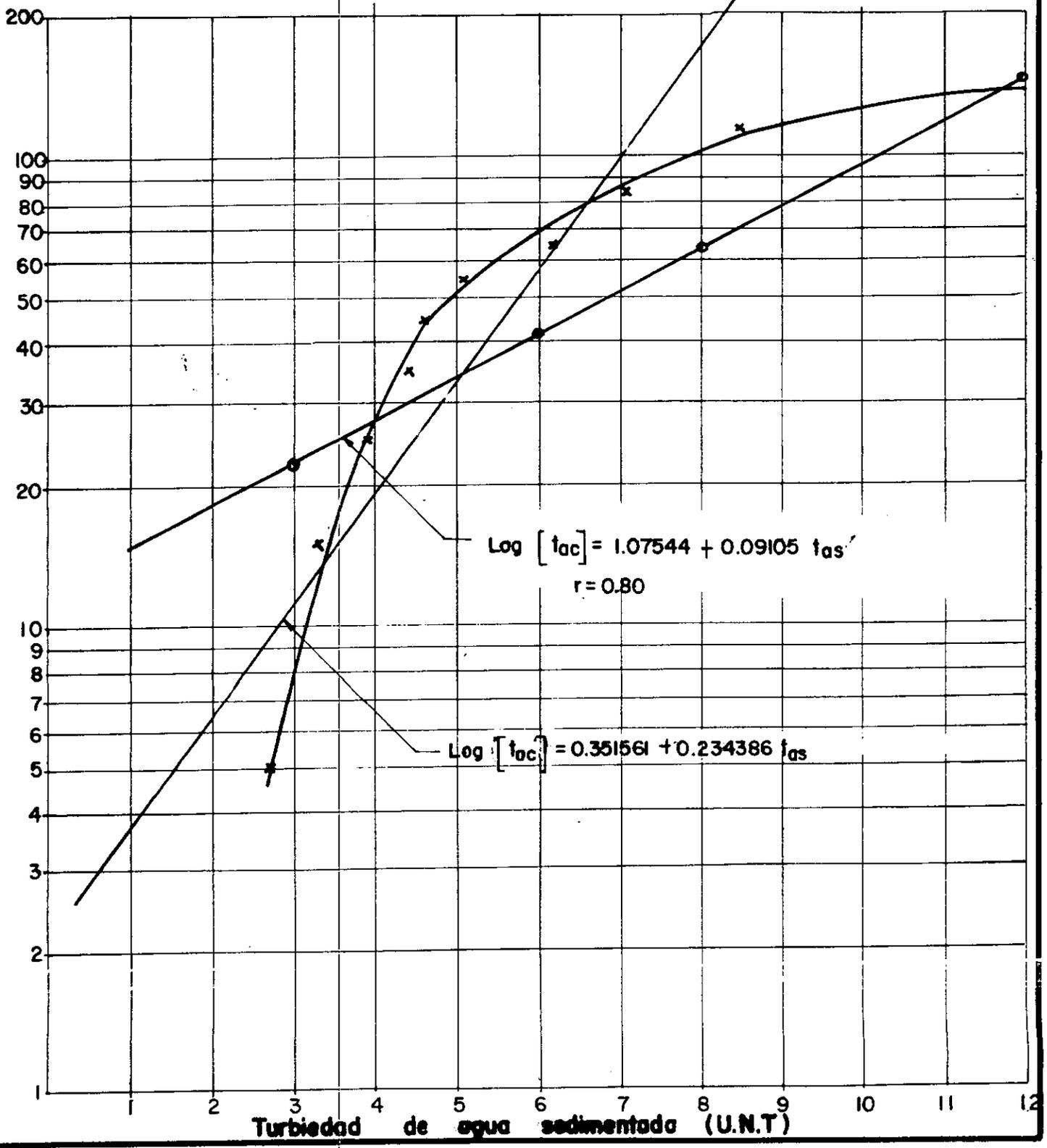


FIGURA 56. EFICIENCIA DEL SEDIMENTADOR DE LA PLANTA 2



$$I = \frac{|T_L - T_P|}{T_L} \times 100$$

Esta relación nos da una idea de que tanto se aleja el funcionamiento del sedimentador del punto de máximo rendimiento. Con el valor de I se clasifica la eficiencia del sedimentador. (Tabla 65).

**TABLA 66.** Eficiencia comparativa de sedimentadores.

Clasificación	Valor de I
Muy buena	> 90
Buena	80 - 90
Regular	< 80

Es de anotar que en los registros de la planta no se encuentran los datos correspondientes a un sedimentador específico. Se toman diariamente muestras de agua sedimentada de cualquiera de los sedimentadores de cada planta. Así los resultados no reflejan con certeza la eficiencia de los mismos.

Los valores de eficiencia encontrados para las turbiedades de agua cruda de más frecuencia en las plantas uno y dos son los tabulados a continuación. (Tabla 67).

TABLA 67. Eficiencia de la sedimentación para distintas turbiedades del agua cruda a tratar.

TAC UNT	Planta 1			Planta 2		
	TAS Planta	TAS Lab.	I	TAS Planta	TAS Lab.	I
5	2,5	1,5	31	2,5	1,5	31
15	2,5	3,5	71	2,5	3,5	71
25	2,8	4,5	62	3,5	4,5	79
35	4,1	5,1	81	5,1	5,1	99
45	5,1	5,6	92	6,3	5,6	86
55	5,9	5,9	99	7,3	5,9	77
65	6,6	6,2	95	8,1	6,2	70
75	7,1	6,5	90	8,8	6,5	65
85	7,6	6,7	87	9,4	6,7	61
95	8,1	6,9	84	9,9	6,9	57
105	8,5	7,1	81	10,4	7,1	54
115	8,8	7,3	79	10,8	7,3	52
135	9,5	7,6	75	11,6	7,6	47
145	9,7	7,7	74	11,9	7,7	46

Conocida la turbiedad del agua cruda, puede estimarse la turbiedad que tendrá el agua sedimentada tanto en el laboratorio como en las plantas de tratamiento, con las siguientes expresiones:

- En la planta uno:  $T_{as} = [ \text{Log}(T_{ac}) - 1,09470 ] / 0,10953$
- En la planta dos:  $T_{as} = [ \text{Log}(T_{ac}) - 1,07544 ] / 0,09105$
- En el laboratorio:  $T_{as} = [ \text{Log}(T_{ac}) - 0,35156 ] / 0,23439$

Al revisar los resultados se observa que la eficiencia del proceso de sedimentación puede calificarse como buena cuando la turbiedad del agua cruda a tratar esta en el rango de 30 a 100 U.N.T. para la planta uno y de 30 a 60 U.N.T. para la planta dos.

Esta diferencia de eficiencia entre las dos plantas no es debida a las unidades de sedimentación pues estan son de dimensiones muy similares para ambas plantas. La causa está en la distintas condiciones de floculación que ha tenido el agua en cada planta de tratamiento.

5.3.1.2 En función de la calidad del agua sedimentada. La producción de agua sedimentada de bajas turbiedades aumenta la eficiencia de los filtros rápidos usados en las plantas uno y dos. Por eso en forma similar al del numeral anterior, a partir de los reportes de laboratorio se agrupan los datos de turbiedad de agua sedimentada y se encuentra su frecuencia de presentación anual.

Con estos datos se grafica la curva de frecuencia acumulada para cada planta y se clasifica al sedimentador en función de la calidad del agua producida según la Tabla 68.

**TABLA 68.** Clasificación de sedimentadores en función de la calidad de agua producida.

Eficiencia	Turbiedad de agua sedimentada (UNT)
Excelente	< 5
Muy buena	5 - 10
Buena	10 - 15
Regular	> 15

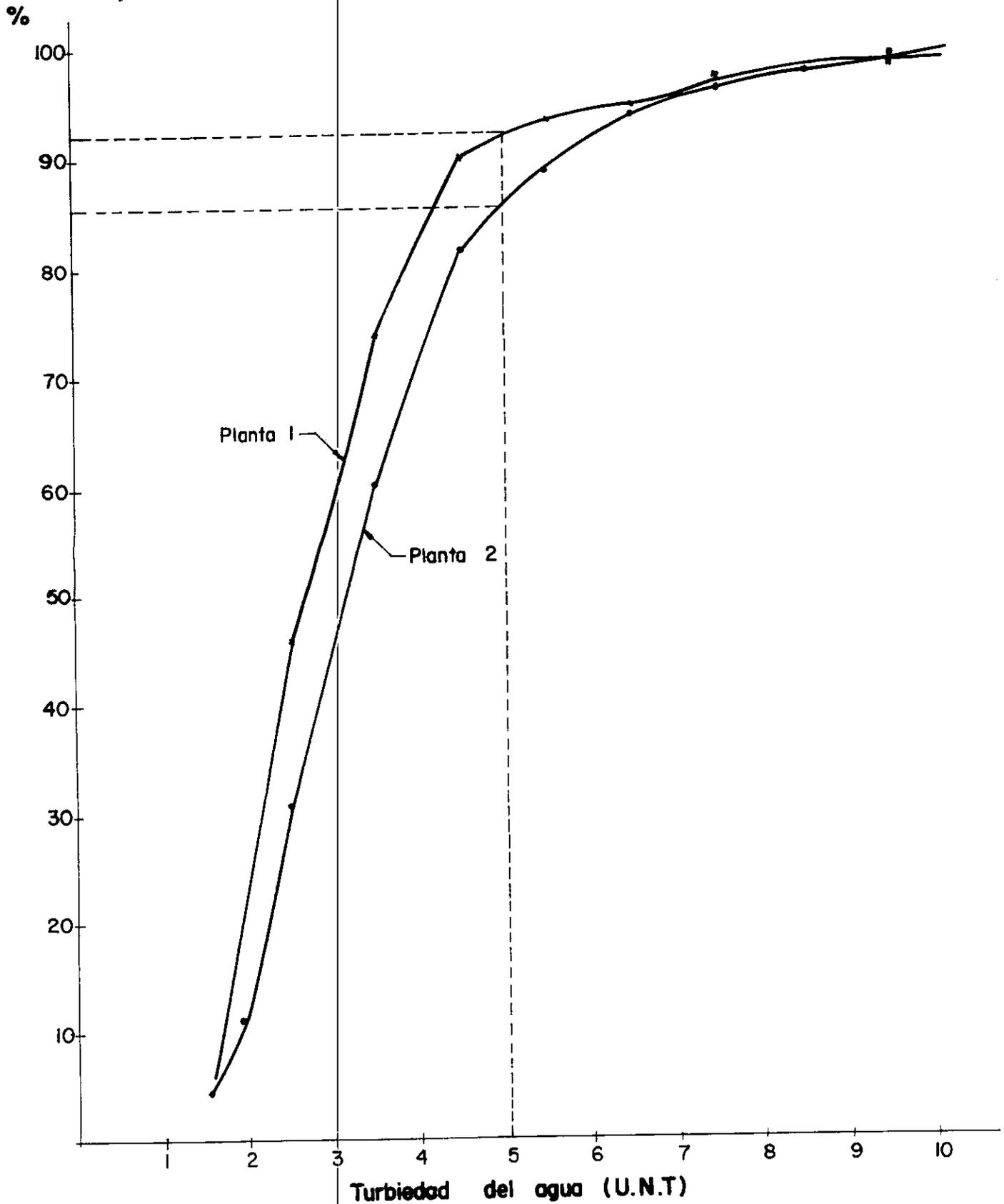
Las frecuencias presentadas en el periodo evaluado son las consignadas en la Tabla 69 y Figura 57.

**TABLA 69.** Eficiencia del proceso de sedimentación en función de la calidad del agua producida. Plantas 1 y 2.

Calidad agua producida		En la Planta 1				En la Planta 2			
Rango de Turbiedad (U.N.T.)	Promedio (U.N.T.)	Frecuencia Presentada		Frecuencia Acumulada		Frecuencia Presentada		Frecuencia Acumulada	
		n	%	n	%	n	%	n	%
1,0 - 1,99	1,5	17	6,0	17	5,9	13	4,5	13	4,5
2,0 - 2,99	2,5	116	40,0	133	45,9	76	26,4	89	30,9
3,0 - 3,99	3,5	81	28,0	214	73,8	84	29,2	173	60,1
4,0 - 4,99	4,5	47	16,0	261	90,0	62	21,5	235	81,6
5,0 - 5,99	5,5	10	3,0	271	93,4	21	7,3	256	88,9
6,0 - 6,99	6,5	4	1,0	275	94,8	15	5,2	271	94,1
7,0 - 7,99	7,5	7	2,0	282	97,2	8	2,8	279	96,9
8,0 - 8,99	8,5	2	1,0	284	97,9	2	0,7	281	97,6
9,0 - 9,99	9,5	1	0,0	285	98,3	3	1,0	284	98,6
> 10,00		5	2,0	290	100,0	4	1,4	288	100,0

En ella puede observarse que los sedimentadores de la planta uno presentan una eficiencia excelente ( $T_s < 5,0$  U.N.T.), en el 90 % del tiempo, y los de la planta dos, en el 81,6 % del tiempo. Y para ambas plantas la sedimentación se dice que es muy buena en el 98 % del tiempo, por presentarse turbiedades menores de 10 U.N.T. en el agua sedimentada.

FIGURA 57. CURVAS DE FRECUENCIAS ACUMULADAS DE TURBIEDAD EN EL AGUA SEDIMENTADA PLANTAS 1 y 2.



Se observa que persiste la diferencia entre la eficiencia de los sedimentadores de la planta uno con los de la planta dos, causada por el pobre proceso de floculación que se da en esta última planta.

Debe aclararse que debido a que no se lleva un control riguroso de los distintos procesos de tratamiento por parte de los operadores, que incluya la determinación periódica de la turbiedad del efluente de cada unidad, los anteriores datos no sirven para calificar la eficiencia de un sedimentador en particular.

La información disponible son los registros llevados por el laboratorista de la planta, sobre muestras que se toman a primera hora de los días laboralmente hábiles, sobre el afluente de uno cualquiera de los filtros de cada planta de tratamiento. No se pueden evaluar entonces los cambios producidos por corrientes térmicas, o por distintas condiciones de operación.

**5.3.1.3 En función de la carga superficial.** La carga superficial es la velocidad crítica mínima de sedimentación que se espera en promedio presente un determinado porcentaje de partículas de la suspensión. Constituye el factor de más importancia al tratar de evaluar la eficiencia remocional de un sedimentador.

Depende entre otros factores de la calidad del agua cruda (si predomina el color sobre la turbiedad), del peso y grado de hidratación del floc, de la geometría del sedimentador y del coagulante usado.

En la sedimentación de partículas discretas, la eficiencia remocional será:

$$R = \frac{V_s}{V_{sc}}$$

Donde  $V_s$  = Velocidad de sedimentación de las partículas.

$V_{sc}$  = Velocidad de sedimentación correspondiente a la carga superficial utilizada.

Si la fracción de turbiedad o concentración de partículas que quedan en el agua es igual a C, la fracción removida es  $1 - C$ , y la fracción total removida será:

$$R_t = (1 - C) + \frac{V_s}{V_{sc}}$$

Concluimos que la eficiencia es inversamente proporcional a la carga superficial utilizada.

Los ensayos realizados para su evaluación consistieron en simular en un ensayo de jarras las condiciones de operación de la planta para los procesos de coagulación y floculación. Luego se deja sedimentar el agua en las

jarras y se van tomando muestras a una profundidad ( $H_e$ ) en tiempos previamente establecidos.

A cada muestra se le determina la turbiedad residual y se le calcula la velocidad de sedimentación  $V_e = H_e/T_e$  correspondiente. En la Tabla 70 se muestran las condiciones de ensayo en laboratorio, variables similares a las de la planta, y los resultados obtenidos, que permiten dibujar la curva de eficiencia teórica del proceso de sedimentación (Figura 59).

A nivel de la planta, se divide la unidad a evaluar como se muestra en la Figura 58, se determina la turbiedad en los puntos indicados y se grafican los valores de  $T_r/T_o$  para los diversos valores de  $V_e$ . (Figura 59).

El ensayo se realizó sobre tres de los seis sedimentadores posibles, procurando tipificar en cada uno de ellos las distintas condiciones de operación a saber:

- En el sedimentador tres de la planta dos. S3-2. Esta unidad se encontraba totalmente libre de lodos por haber sido recientemente lavado; además estaba recibiendo un caudal muy bajo, en comparación con el de las otras unidades, presentándose por lo tanto una menor carga superficial.

**TABLA 70.** Eficiencia teórica del proceso de sedimentación. Condiciones de ensayo y resultados en laboratorio.

$T_o = 22$  U.N.T.                      M.R. = 30 s      a 100 rpm  
 $C_o = 33$  U.C.                            M.L. = 15 min   a 25 rpm  
 Dosis = 55 ppm                            SED = cada 30 s  
 Profundidad de muestreo:               $H_e = 6$  cm

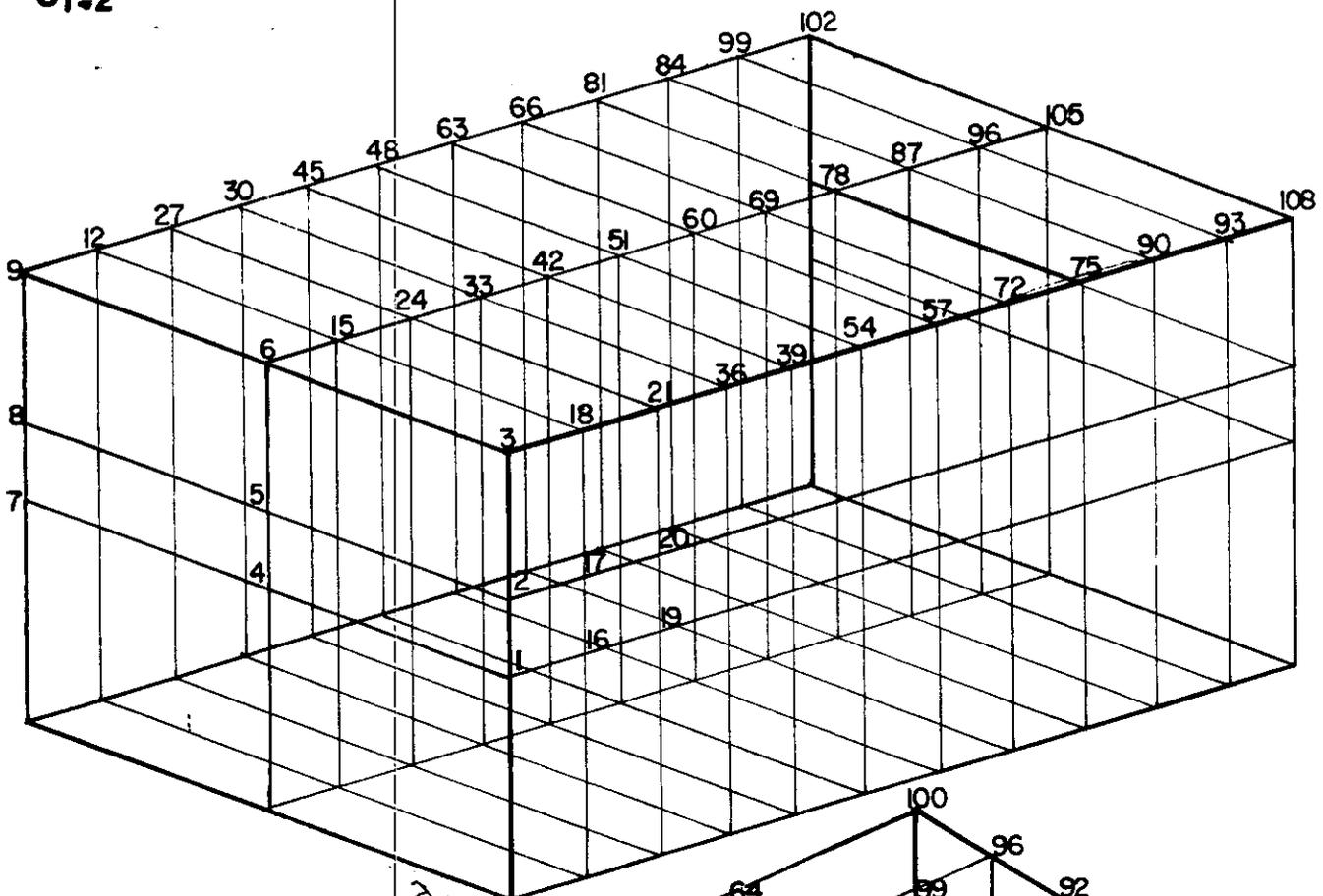
$T_e$ ( s )	$V_e$ ( cm )	Turbiedad $T_x$ (U.N.T.)				
		1-E	2-E	3-E	Media	$T_x/T_o$
30	0,200	26,0	22,0	25,0	24,3	1,10
60	0,100	23,0	22,0	23,0	22,7	1,03
90	0,067	20,0	19,0	19,0	19,3	0,88
120	0,050	16,0	16,0	16,0	16,0	0,73
240	0,025	3,2	3,9	3,5	3,7	0,17
360	0,017	2,6	2,1	3,0	2,6	0,12
480	0,013	3,3	2,0	2,0	2,4	0,11
600	0,010	2,5	1,5	1,5	1,8	0,08

- En el sedimentador uno de la planta uno. S<sub>1-1</sub>. Esta unidad presentaba pocos lodos depositados y era la que más caudal estaba recibiendo, acercandose al supuesto de diseño, 1/3 de 55.000 m<sup>3</sup>/día, es decir 0,212 m<sup>3</sup>/s.

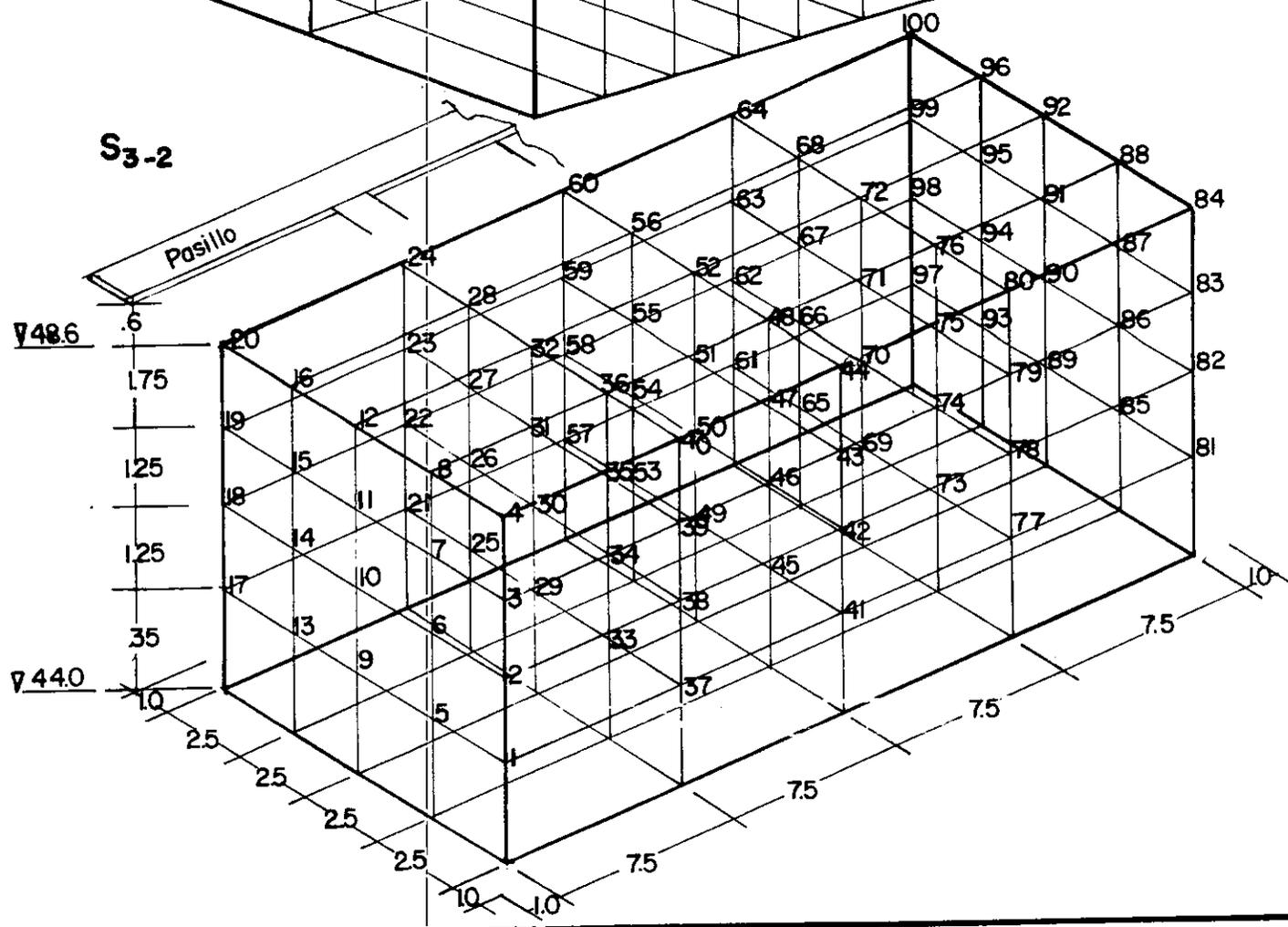
- En el sedimentador uno de la planta dos. S<sub>1-2</sub>. Esta unidad acusaba una gran acumulación de lodos, por lo que los resultados del ensayo no se tienen en cuenta al establecer la eficiencia.

FIGURA 58. LOCALIZACION PUNTOS DE MUESTREO PARA DETERMINAR LINEAS DE ISOTURBIDAD

S1-2



S3-2



La información recogida se muestra en las Tablas 71, 72 y 73 y así como las gráficas correspondientes. (Figura 59).

**TABLA 71.** Eficiencia real del sedimentador S<sub>3</sub>-2. Resumen de datos. Ensayo en la planta con características de mezcla y floculación similares.

Distancia relativa m	Carga superficial m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /día	Velocidad de sedimentación cm/s	Turbiedad media U.N.T.	T <sub>r</sub> /T <sub>0</sub>
1,0	341,9	0,396	4,77	0,22
8,5	40,2	0,047	3,58	0,16
16,0	21,4	0,025	2,51	0,11
23,5	14,5	0,017	2,93	0,13
31,0	11,0	0,013	2,37	0,11

**TABLA 72.** Eficiencia real del sedimentador S<sub>1</sub>-1. Resumen de datos. Ensayo en la planta con características de mezcla y floculación similares.

Distancia relativa m	Carga superficial m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /día	Velocidad de sedimentación cm/s	Turbiedad media U.N.T.	T <sub>r</sub> /T <sub>0</sub>
1,0	1.615,0	1,870	19,00	0,86
5,5	293,6	0,340	16,30	0,74
8,5	190,0	0,220	14,10	0,64
16,0	100,9	0,117	8,20	0,37
23,5	68,7	0,080	4,30	0,20
31,0	52,0	0,060	2,70	0,12

**TABLA 73.** Eficiencia real del sedimentador S<sub>1-2</sub>. Resumen de datos. Ensayo en la planta con características de mezcla y floculación similares.

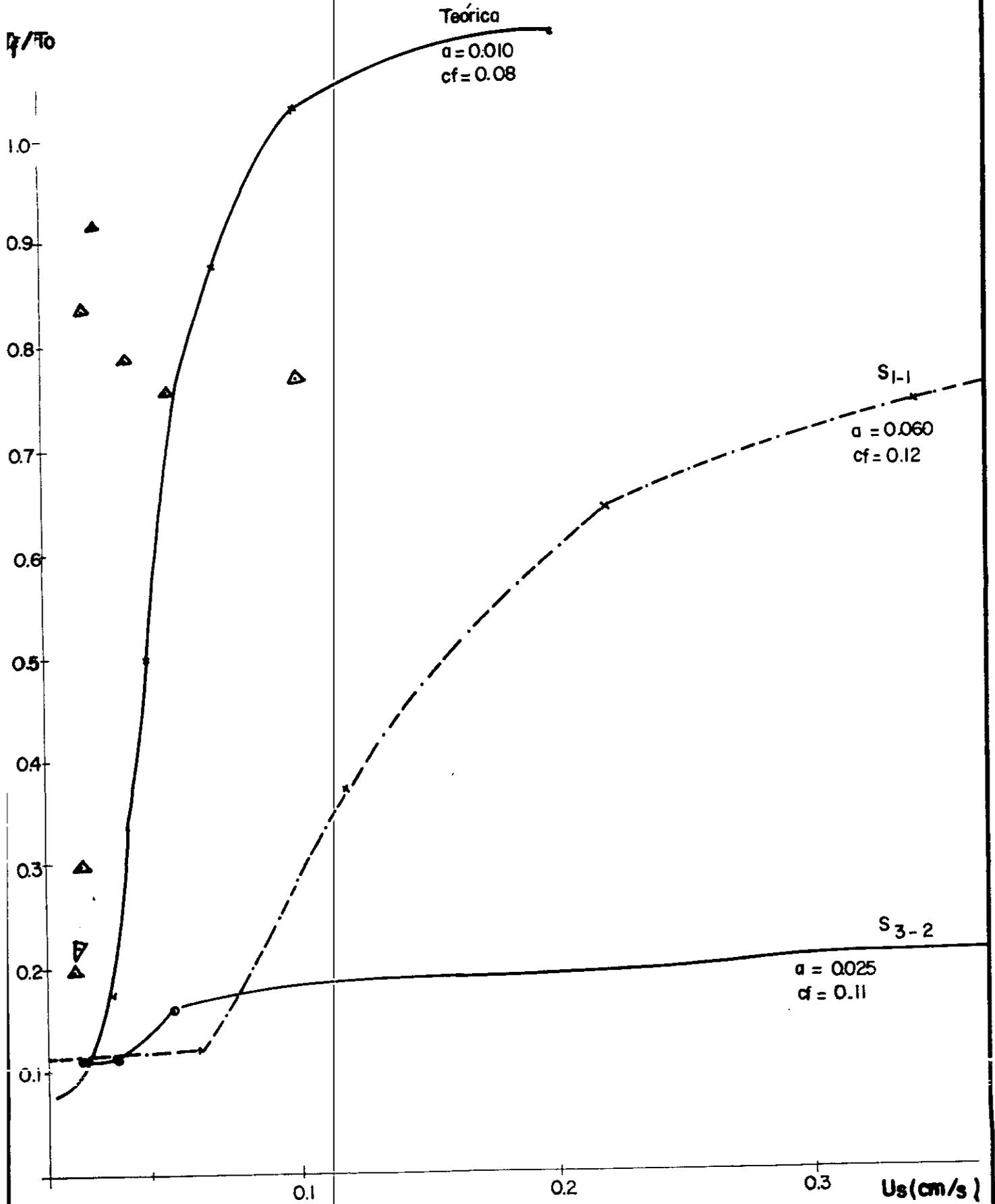
Distancia relativa m	Carga superficial m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /día	Velocidad de sedimentación cm/s	Turbiedad media U.N.T.	T <sub>r</sub> /T <sub>o</sub>
2,6	86,4	0,1000	16,83	0,77
5,2	43,2	0,0500	16,67	0,76
7,8	28,8	0,0333	17,42	0,79
10,4	21,6	0,0250	16,92	0,77
13,0	17,3	0,0200	20,17	0,92
15,6	14,4	0,0167	18,57	0,84
18,2	12,3	0,0143	6,67	0,30
20,8	10,8	0,0125	4,80	0,22
23,4	9,6	0,0111	4,30	0,20
26,0	8,6	0,0100	9,03	0,41
28,6	7,9	0,0091	7,77	0,35
31,2	7,2	0,0083	6,97	0,32

A partir de los datos de laboratorio se determina la remoción total que producirá un sedimentador ideal para agua floculada de la calidad que se estima debe darse en la planta.

Para el periodo de retención teórico de un decantador tipo de los de las plantas uno y dos, de 260 minutos, se tiene una velocidad crítica de sedimentación igual a,

$$V_{ec} = \frac{h}{T} = \frac{4,7 \text{ m} \times 100 \text{ cm/m}}{260 \text{ min} \times 60 \text{ s/min}} = 0,030 \text{ cm/s}$$

FIGURA 59. EFICIENCIA DEL PROCESO DE SEDIMENTACION EN FUNCION DE LA CARGA SUPERFICIAL. PLANTAS 1 y 2



De la Figura 59, se tiene que para  $V_{sc} = 0,030$  cm/s, corresponde un porcentaje de turbiedad remanente  $C_o = 0,28$  y al mínimo porcentaje de turbiedad no removida  $C_f = 0,08$  corresponde una velocidad de sedimentación,  $a = 0,010$ .

Entonces la turbiedad total removida, teóricamente, es:

$$\begin{aligned} R_T &= 1 - (C_o - C_f) + \{(a + V_{sc}) (C_o - C_f)/2\} / V_{sc} \\ &= 1 - (0,28 - 0,08) + \{(0,010 + 0,030)(0,28 - 0,08)/2\} / 0,030 \\ &= 0,933 \cong 93,3\% \end{aligned}$$

De igual forma para el sedimentador S3-2, se tiene:

$$a = 0,025 \qquad C_f = 0,11 \qquad C_o = 0,12$$

$$\begin{aligned} R_{TP} &= 1 - (C_o - C_f) + \{(a + V_{sc}) (C_o - C_f)/2\} / V_{sc} \\ &= 1 - (0,12 - 0,11) + \{(0,025 + 0,030)(0,12 - 0,11)/2\} / 0,030 \\ &= 0,999 \cong 99,9\% \end{aligned}$$

Y para el sedimentador S1-1,

$$a = 0,060 \qquad C_f = 0,12 \qquad C_o = 0,12$$

$$\begin{aligned} R_{TP} &= 1 - (C_o - C_f) + \{(a + V_{sc}) (C_o - C_f)/2\} / V_{sc} \\ &= 1,000 \cong 100,0\% \end{aligned}$$

La eficiencia se establece por la relación entre la remoción en la planta y la remoción teórica para la misma calidad de agua floculada.

Para el sedimentador S3-2:

$$I = \frac{R_{TP}}{R_T} = \frac{99,90}{93,30} = 1,071$$

Para el sedimentador S1-1:

$$I = \frac{R_{TP}}{R_T} = \frac{100,00}{93,30} = 1,072$$

Estas eficiencias mayores al 100 % indican que los sedimentadores estan trabajando con cargas superficiales muy bajas, pues lo corriente es diseñar estas unidades para que produzcan una remoción del 90 %.

Esta remoción corresponde a una carga superficial aproximada de 0,086 cm/s, es decir 74 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día.

Si se lograra que los seis sedimentadores de estas plantas trabajaran con esta carga superficial, se producirian entonces:

$$74 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día} \times 6 \text{ u} \times 32 \text{ m} \times 12 \text{ m} = 170.496,0 \text{ m}^3/\text{día}.$$

Es de anotar que al momento de estos estos ensayos, las turbiedades del agua cruda eran bajas, siendo lógico esperar una mayor eficiencia y/o producción con turbiedades un poco más altas.

**5.3.1.4 En función del pretratamiento.** En la sedimentación de partículas floculentas los factores principales que influyen en la velocidad de sedimentación son su tamaño, forma, consistencia y densidad. Estos a su vez dependen de la dosis óptima de coagulante y de las intensidades y tiempos de mezcla tanto rápida como lenta.

La actividad de evaluación consistió en simular en un ensayo de jarras las condiciones ideales de coagulación y floculación. Luego dejar sedimentar y tomar muestras para análisis de turbiedad residual a tiempos preestablecidos,

y graficar  $V_s$  vs  $T_f$  en papel semilog.

En el campo se procedió a la toma de muestras en jarras de dos litros a la salida de los floculadores. Se les dejó sedimentar por diez minutos y se tomaron las muestras para análisis de turbiedad residual.

Cotejando estos valores de turbiedad remanente se establece la eficiencia del proceso, dada por la expresión:

$$I = \frac{T_1}{T_P} \times 100$$

y en base a ésta clasificar el sedimentador, demostrando la importancia de las fallas en las unidades de coagulación.

El criterio de clasificación es el dado en la Tabla 74.

**TABLA 74.** Calificación de la eficiencia en función de la carga superficial.

Valor de I	Clasificación
> 90	Excelente
80 - 90	Muy bueno
60 - 70	Bueno
< 60	Deficiente

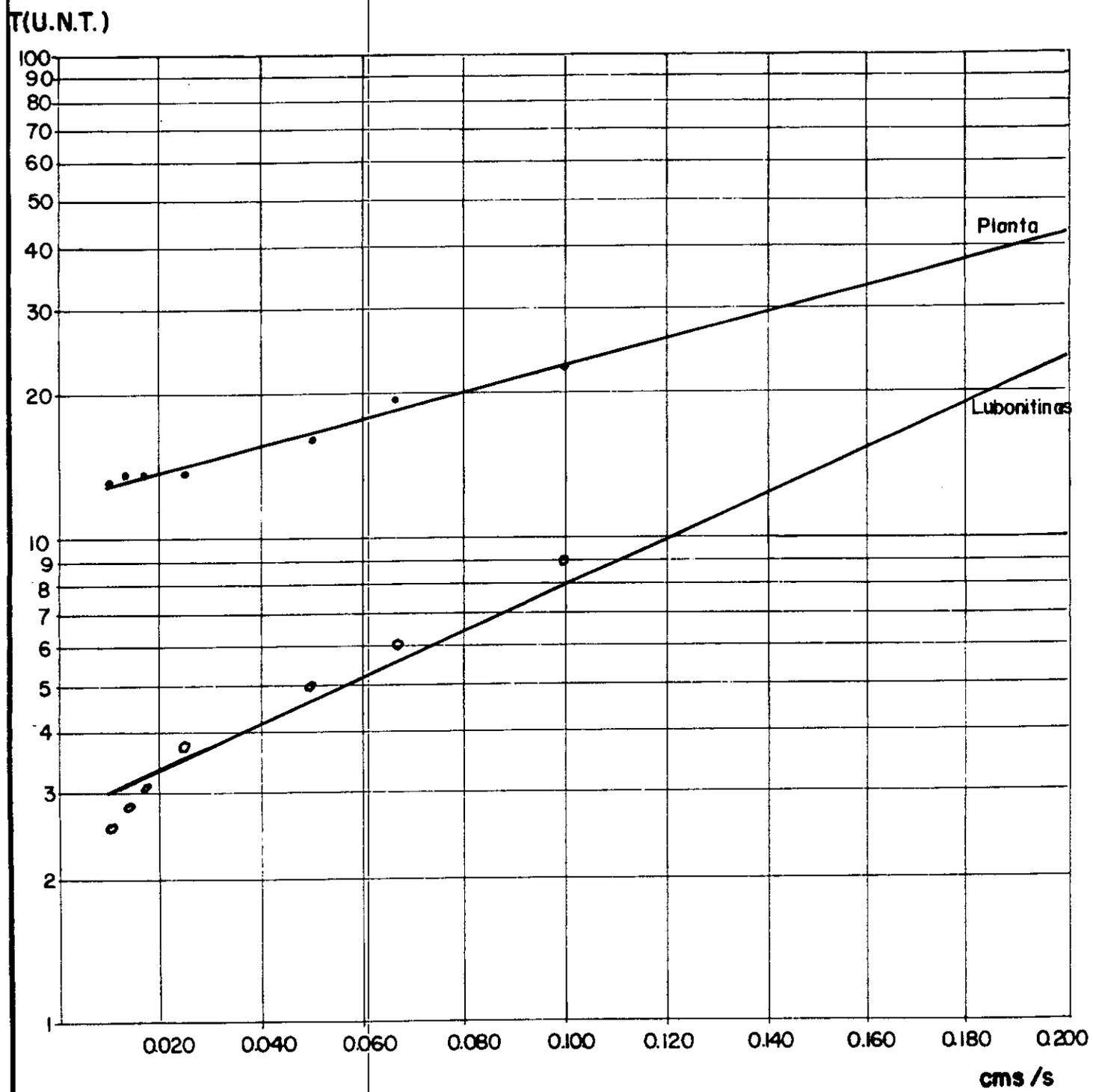
Los datos y resultados obtenidos son mostrados en la Tabla 75 y la Figura 60.

**TABLA 75.** Eficiencia de la sedimentación en función del pretratamiento. Plantas uno y dos.

Datos de ensayo		Laboratorio					Planta			
$T_0$		22 U.N.T.					22 U.N.T.			
Coagulante		57 p.p.m de sulfato de aluminio								
M.R.		30 s a 100 rpm								
M.L.		15 min a 25 rpm								
SED		tiempos variables								
$t_a$ (s)	$V_a$ cm/s	Turbiedades (U.N.T)								
		1-E	2-E	3-E	$X_1$	4-E	5-E	6-E	$X_2$	
30	0,20	26,0	22,0	25,0	24,3	44,0	49,0	36,0	43,0	
60	0,10	10,2	8,0	8,8	9,0	24,0	26,0	20,3	22,5	
90	0,067	6,7	5,5	5,8	6,0	18,0	22,0	17,0	19,0	
120	0,050	5,4	4,7	4,9	5,0	16,0	18,0	14,0	16,0	
240	0,025	3,9	3,6	3,5	3,7	13,3	15,0	12,5	13,6	
360	0,017	3,3	3,1	3,0	3,1	13,0	14,8	12,4	13,4	
480	0,013	3,1	2,7	2,6	2,8	12,6	14,8	12,2	13,2	
600	0,010	2,7	2,5	2,5	2,5	11,8	14,4	11,6	12,6	

Para evaluar la eficiencia se comparan las turbiedades que se obtendrían en el laboratorio y en la planta, para la carga superficial con que estan operando los sedimentadores. Esta última es variable de una unidad a

FIGURA 60. INFLUENCIA DEL PRETRATAMIENTO EN EL PROCESO DE SEDIMENTACION  
 SEDIMENTADOR S<sub>1-1</sub>. PLANTA I



otra, dependiendo del reparto de caudales que se de y de la cantidad de lodos depositados. Aquí se ha usado la carga superficial con que operaba el sedimentador uno de la planta uno, S<sub>1-1</sub>, de 50 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día, que corresponde a una velocidad de sedimentación de 0,58 cm/s. Para esta velocidad, de la Figura 60 se tiene:

$$I = \frac{T_L}{T_P} \times 100 = \frac{5,0}{17,6} = 0,28 \approx 28 \%$$

lo que indica que el proceso de coagulación y floculación en la planta esta siendo deficiente.

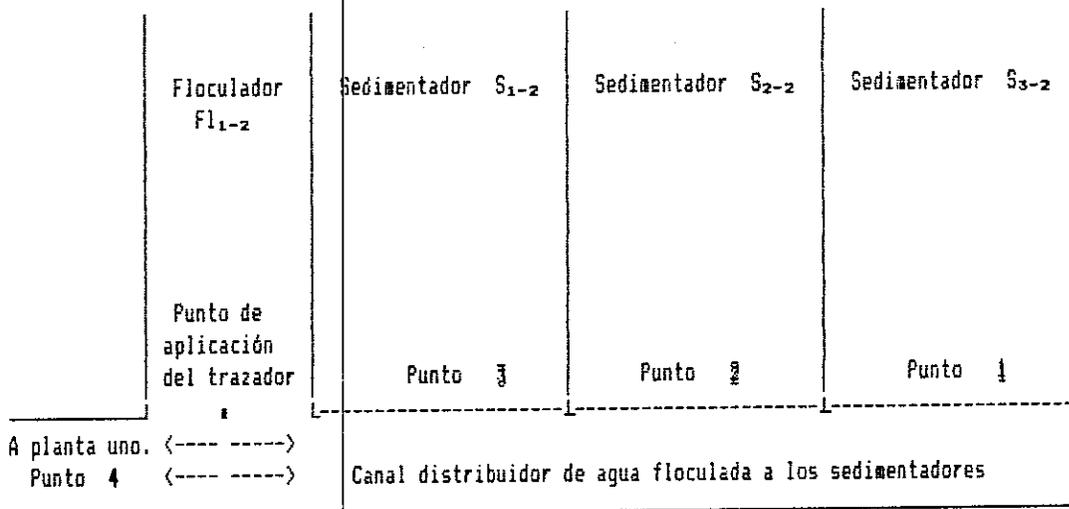
**5.3.2 Determinación de las condiciones hidráulicas en sedimentadores.** La caracterización del flujo en las unidades de sedimentación seleccionadas se hizo mediante el ensayo de trazadores.

Inicialmente se realizó una serie de ensayos de trazadores en los canales de distribución del agua salida de los floculadores hacia los sedimentadores a fin de establecer las condiciones hidráulicas que se presentaban.

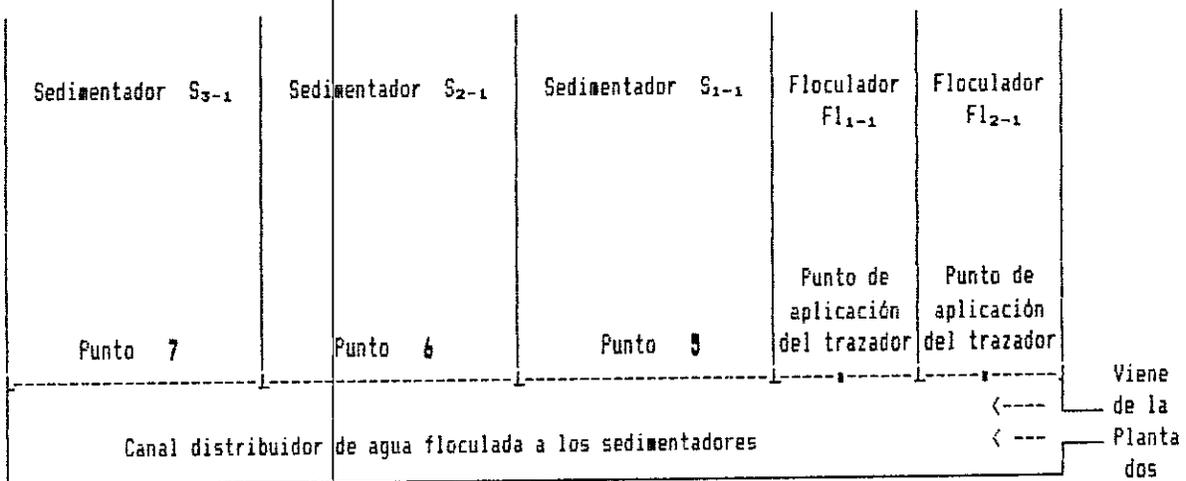
Este ensayo consistió en determinar los caudales de cada planta y en función de este aplicar un trazador en el extremo final de los floculadores. Se tomaron muestras o testigos del paso del trazador a la entrada de cada uno de los sedimentadores y a la salida del canal que

intercomunica las dos plantas. La posición de los sitios de toma de muestras se ve en la siguiente figura.

PLANTA DE TRATAMIENTO DOS



PLANTA DE TRATAMIENTO UNO



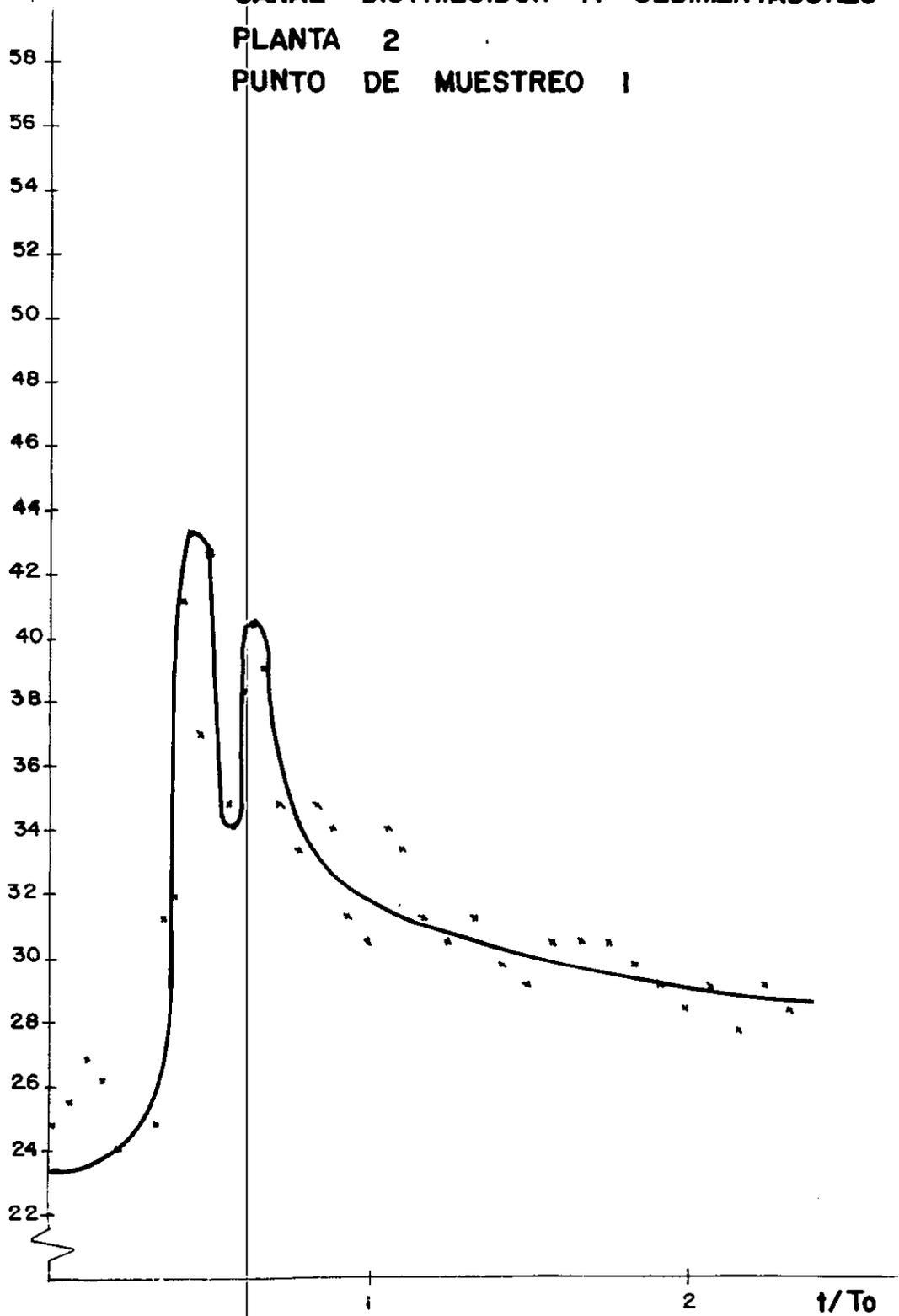
Los datos de ensayo, curvas de concentración vs. tiempo, los resultados de trazador acumulado en el tiempo y las gráficas correspondientes se muestran en las Tablas 76 a 80 y las Figuras 61 a 67.

**TABLA 76.** Datos ensayo de trazadores en canales distribuidores de agua a sedimentadores. Planta dos.

Número de orden de muestra	t (s)	PUNTO 1		PUNTO 2		PUNTO 3		PUNTO 4	
		AgNO <sub>3</sub> ml	Cloruros mg/lit						
1	0	3,5	24,8	3,5	24,8	3,5	24,8	3,3	23,4
2	20	3,6	25,5	3,4	24,1	3,6	25,5	3,4	24,1
3	40	3,8	26,9	3,3	23,4	3,5	24,8	3,5	24,8
4	60	3,7	26,2	3,4	24,1	3,5	24,8	7,1	50,4
5	80	3,4	24,1	3,4	24,1	3,5	24,8	5,6	39,7
6	100	3,5	24,8	3,5	24,8	3,6	25,5	5,7	40,4
7	120	3,5	24,8	3,4	24,1	3,5	24,8	5,1	36,2
8	130	4,4	31,2	3,4	24,1	3,4	24,1	4,5	31,9
9	140	4,5	31,9	6,2	44,0	3,4	24,1	5,0	35,5
10	150	5,8	41,1	3,4	24,1	3,4	24,1	4,5	31,9
11	160	6,1	43,3	5,1	36,2	3,6	25,5	5,2	36,9
12	170	5,2	36,9	4,6	32,6	3,9	27,7	5,1	36,2
13	180	6,0	42,6	4,3	30,5	3,6	25,5	4,5	31,9
14	190	5,2	36,9	4,1	29,1	3,5	24,8	3,8	26,9
15	200	4,9	34,8	4,6	32,6	3,4	24,1	3,8	26,9
16	210	4,8	34,0	5,0	35,5	3,4	24,1	4,2	29,8
17	220	5,4	38,3	5,2	36,9	3,4	24,1	4,0	28,4
18	230	5,7	40,4	6,9	48,9	3,4	24,1	3,9	27,7
19	240	5,5	39,0	7,0	49,6	3,4	24,1	3,9	27,7
20	260	4,9	34,8	7,0	49,6	3,5	24,8	3,8	26,9
21	280	4,7	33,3	7,9	56,0	3,5	24,8	3,5	24,8
22	300	4,9	34,8	7,7	54,6	3,4	24,1	3,4	24,1
23	320	4,8	34,0	7,3	51,8	3,6	25,5	3,5	24,8
24	340	4,4	31,2	7,3	51,8	3,5	24,8	3,9	27,7
25	360	4,3	30,5	8,8	62,4	4,4	31,2	3,5	24,8
26	380	4,8	34,0	8,9	63,1	4,4	31,2	3,5	24,8
27	400	4,7	33,3	8,3	58,9	4,4	31,2	3,5	24,8
28	420	4,4	31,2	7,9	56,0	4,3	30,5	3,8	26,9
29	450	4,3	30,5	6,6	46,8	4,5	31,9	3,5	24,8
30	480	4,4	31,2	7,1	50,4	4,7	33,3	3,4	24,1
31	510	4,2	29,8	6,7	47,5	4,6	32,6	3,5	24,8
32	540	4,1	29,1	5,9	41,8	4,6	32,6	3,5	24,8
33	570	4,3	30,5	5,5	39,0	4,3	30,5	3,4	24,1
34	600	4,3	30,5	5,1	36,2	4,1	29,1	3,3	23,4
35	630	4,3	30,5	5,0	35,5	4,3	30,5	3,3	23,4
36	660	4,2	29,8	4,9	34,8	4,3	30,5	3,4	24,1
37	690	4,1	29,1	4,6	32,6	4,2	29,8	3,3	23,4
38	720	4,0	28,4	4,5	31,9	4,1	29,1	3,4	24,1
39	750	4,1	29,1	4,9	34,8	4,1	29,1	3,4	24,1
40	780	3,9	27,7	4,5	31,9	3,8	26,9	3,4	24,1
41	810	4,1	29,1	4,4	31,2	4,1	29,1	3,4	24,1
42	840	4,0	28,4	4,5	31,9	3,9	27,7	3,4	24,1

C  
(mg / lt)

FIGURA 61. ENSAYO DE TRAZADORES  
CANAL DISTRIBUIDOR A SEDIMENTADORES  
PLANTA 2  
PUNTO DE MUESTREO 1



ENERO 30/90

FIGURA 62. ENSAYO DE TRAZADORES  
CANAL DISTRIBUIDOR A SEDIMENTADORES  
PLANTA 2  
PUNTO DE MUESTREO 2

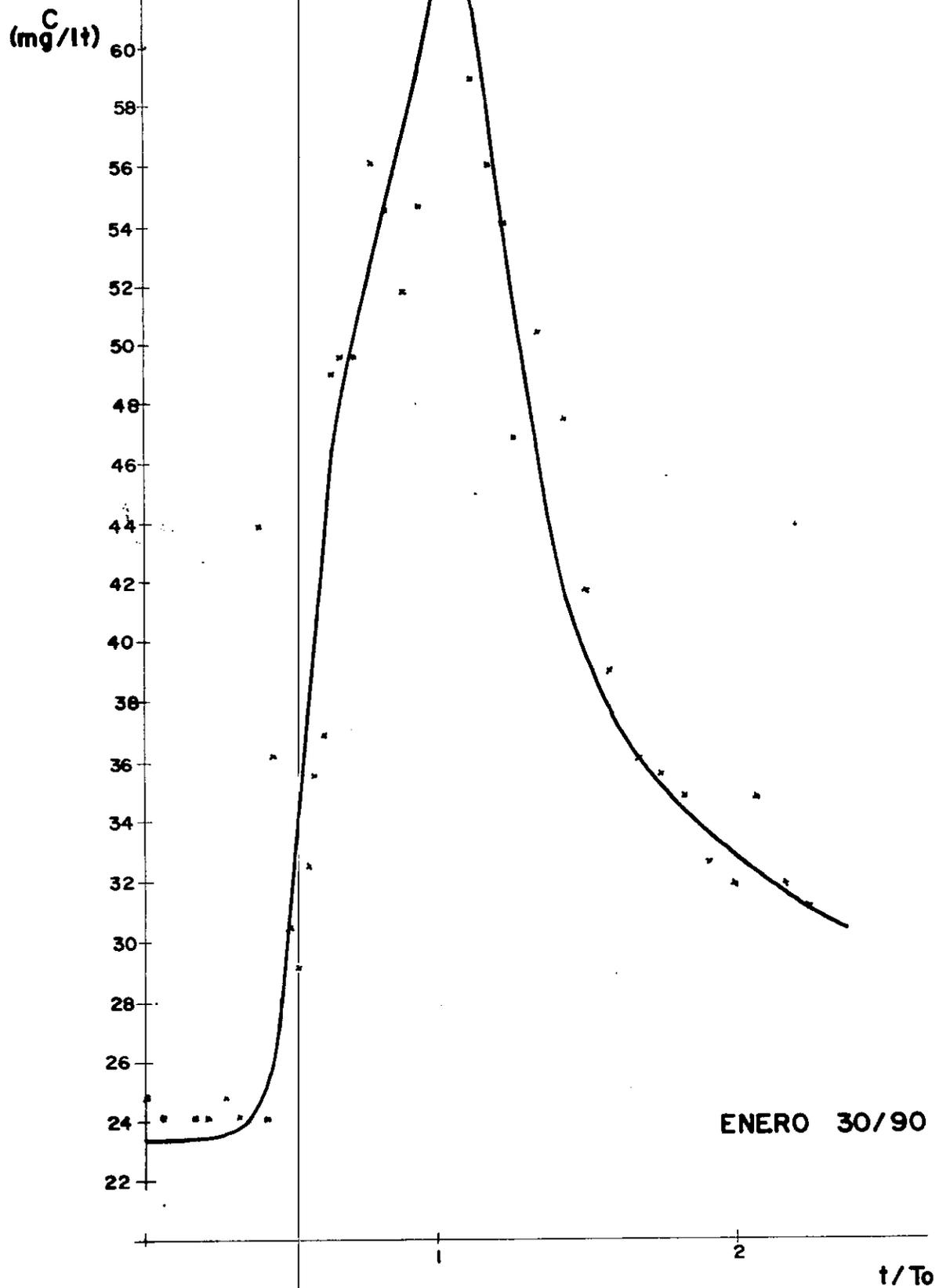
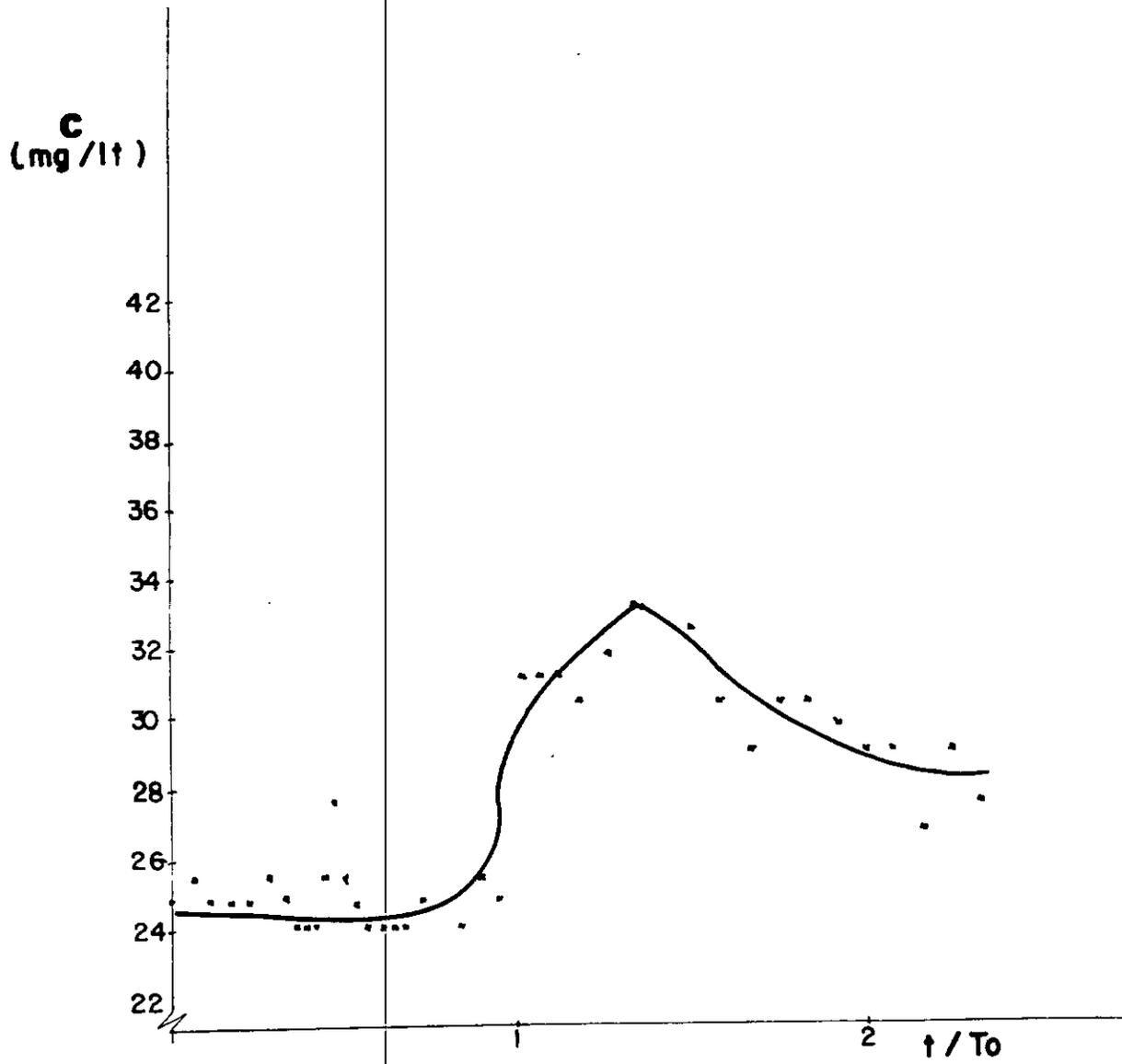
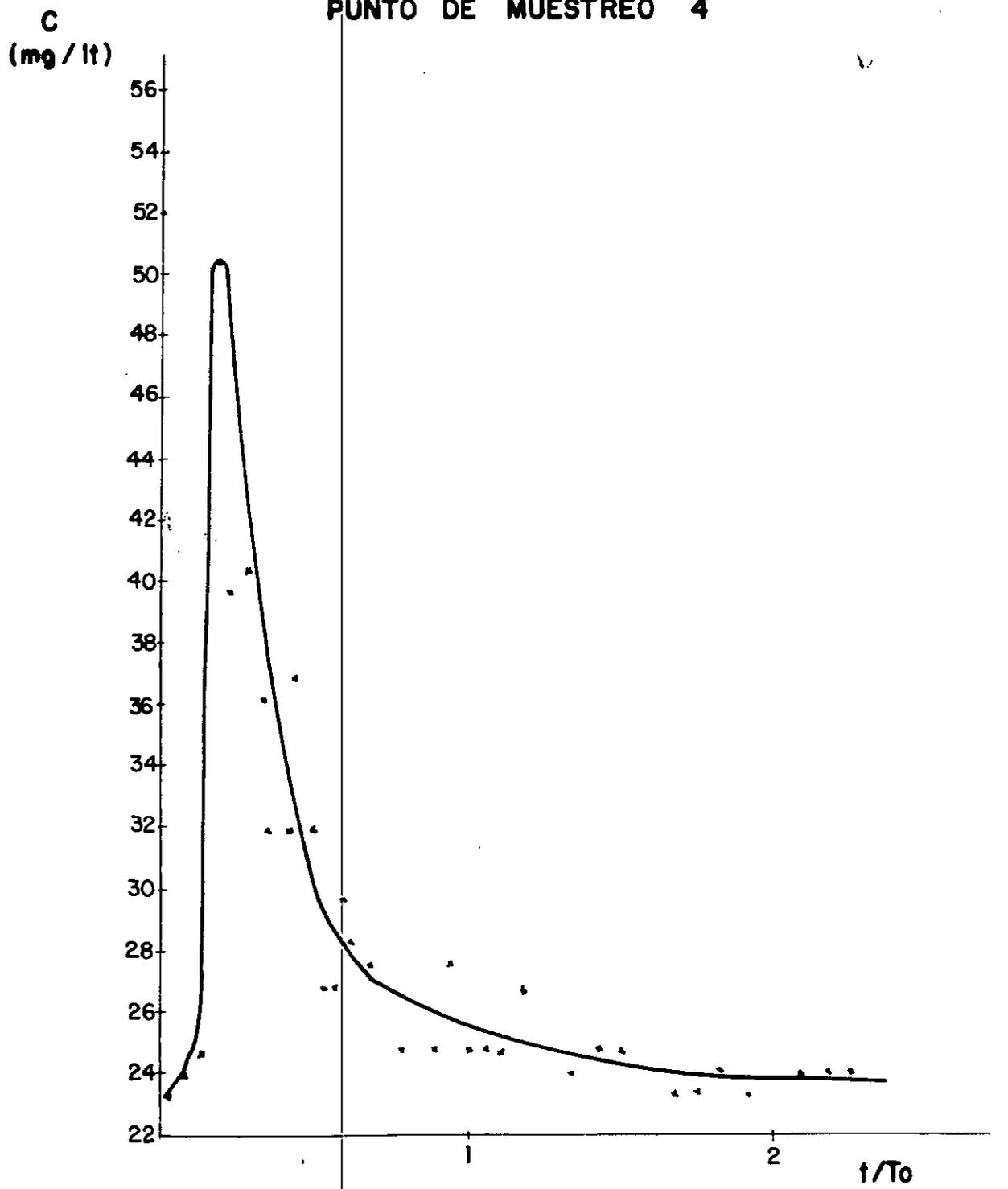


FIGURA 63. ENSAYO DE TRAZADORES  
CANAL DISTRIBUIDOR A SEDIMENTADORES  
PLANTA 2  
PUNTO DE MUESTREO 3



ENERO 30 / 90

FIGURA 64. ENSAYO DE TRAZADORES  
CANAL DISTRIBUIDOR A SEDIMENTADORES  
PLANTA 2  
PUNTO DE MUESTREO 4

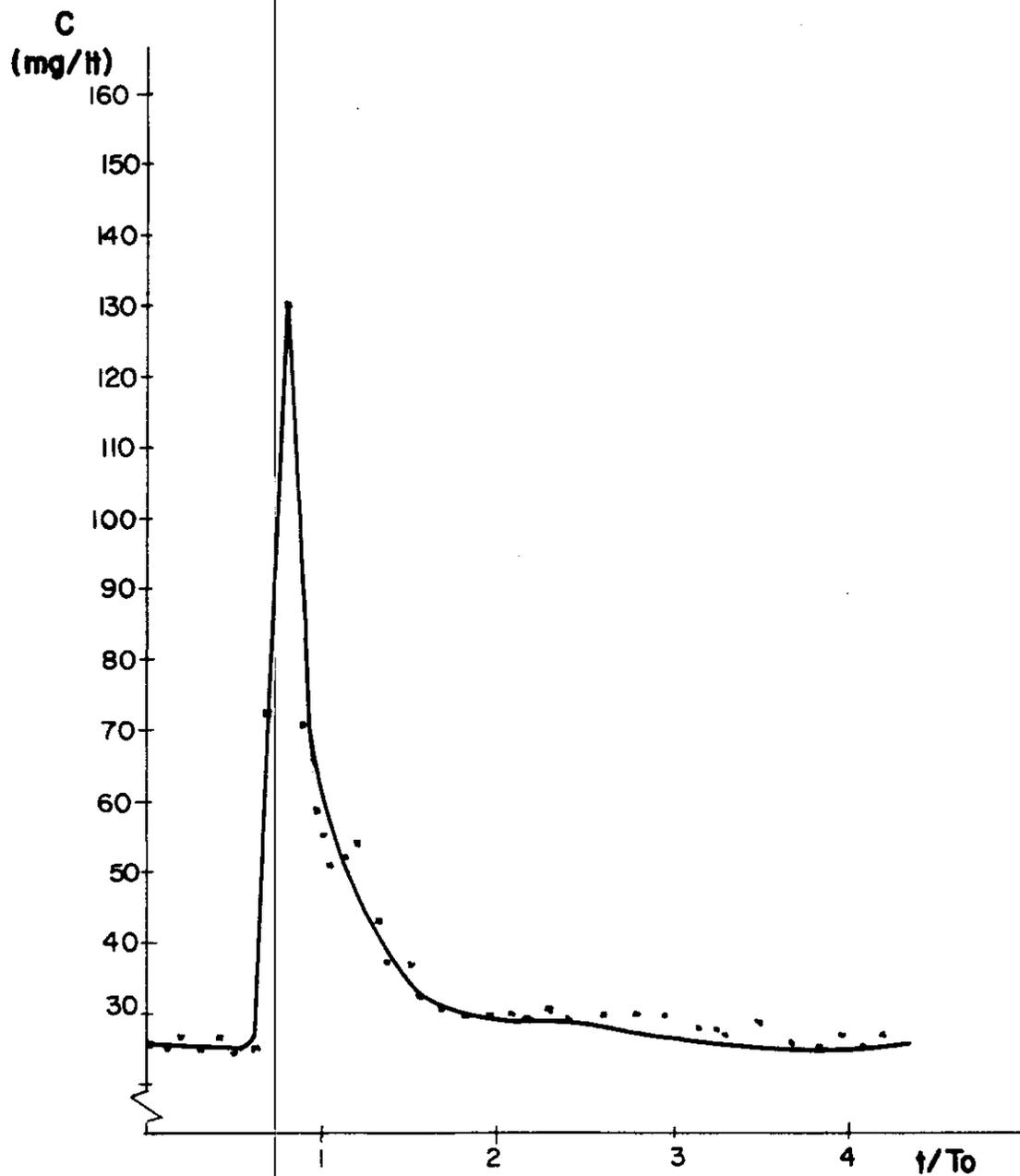


ENERO 30 / 90

TABLA 77. Datos ensayo de trazadores en canales distribuidores de agua a sedimentadores. Planta uno.

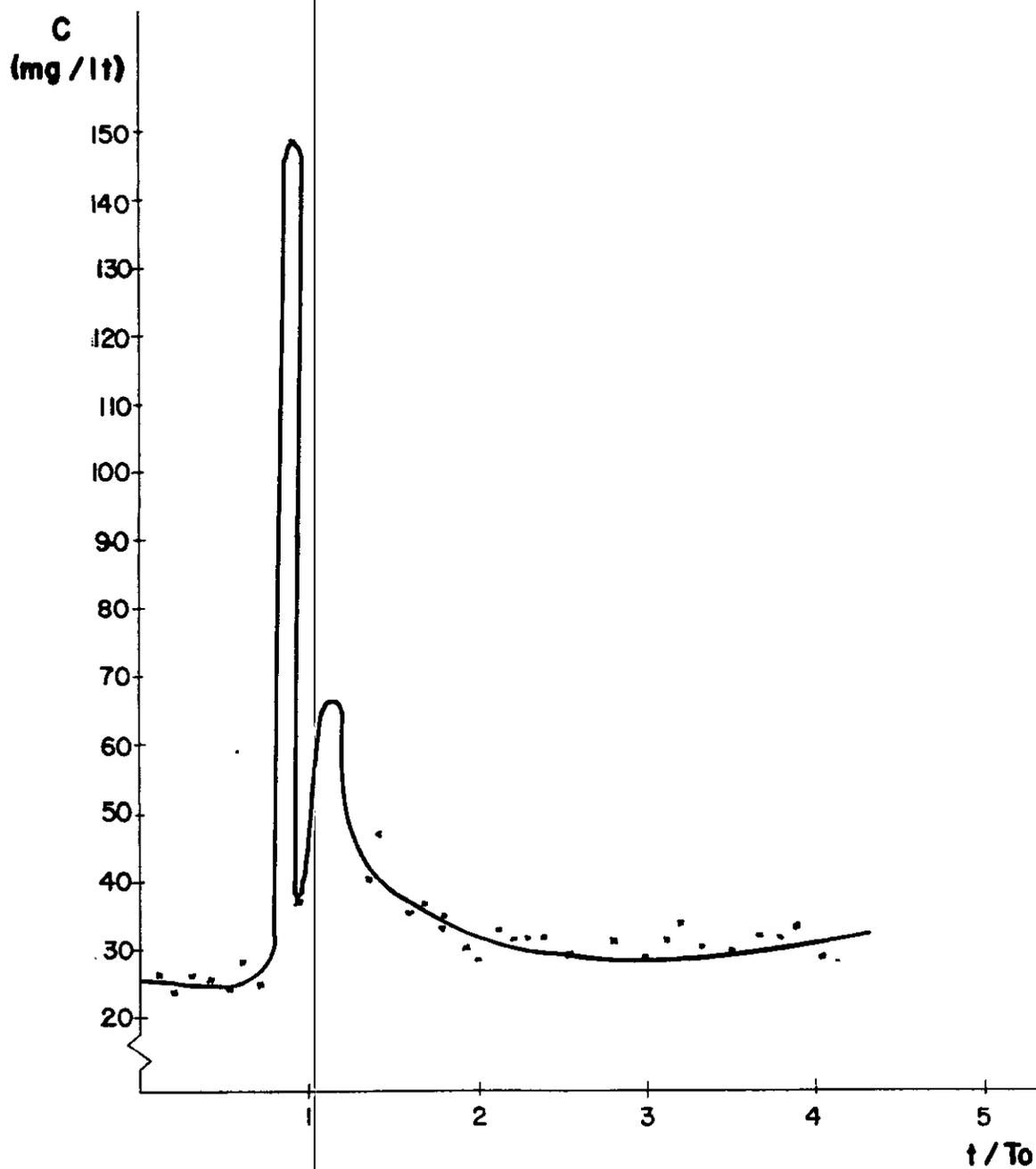
Número de orden	t (s)	PUNTO 5		PUNTO 6		PUNTO 7	
		AgNO <sub>3</sub> ml	Cloruros mg/lit	AgNO <sub>3</sub> ml	Cloruros mg/lit	AgNO <sub>3</sub> ml	Cloruros mg/lit
1	0	3,5	24,8	3,4	24,1	3,4	24,1
2	15	3,4	24,1	3,6	25,5	3,4	24,1
3	30	3,6	25,5	3,5	24,8	3,4	24,1
4	45	3,5	24,8	3,7	26,2	3,4	24,1
5	60	3,6	25,5	3,6	25,5	3,5	24,8
6	75	3,5	24,8	3,5	24,8	3,4	24,1
7	90	3,6	25,5	4,0	28,4	3,5	24,8
8	105	10,2	72,3	3,6	25,5	3,5	24,8
9	120	18,4	130,5	13,6	96,5	3,5	24,8
10	130	10,0	70,9	20,9	148,2	3,5	24,8
11	140	8,2	58,2	5,3	37,6	3,5	24,8
12	150	7,8	55,3	6,7	47,5	3,5	24,8
13	160	7,2	51,1	9,0	63,8	3,4	24,1
14	170	7,3	51,8	9,1	64,5	3,5	24,8
15	180	7,5	53,2	7,5	53,2	3,5	24,8
16	190	6,2	44,0	7,0	49,6	3,5	24,8
17	200	5,5	39,0	6,0	42,6	3,7	26,2
18	210	5,3	37,6	6,5	46,1	3,5	24,8
19	220	4,8	34,0	5,6	39,7	3,4	24,1
20	230	4,9	34,8	5,1	36,2	3,4	24,1
21	240	4,6	32,6	5,0	35,5	3,4	24,1
22	250	4,5	31,9	4,7	33,3	3,5	24,8
23	260	4,4	31,2	4,8	34,0	3,4	24,1
24	270	4,3	30,5	4,6	32,6	7,5	53,2
25	280	4,2	29,8	4,2	29,8	6,0	42,6
26	290	4,2	29,8	4,2	29,8	5,8	41,1
27	300	4,2	29,8	4,1	29,1	4,0	28,4
28	310	4,1	29,1	4,7	33,3	4,2	29,8
29	320	4,3	30,5	4,5	31,9	4,3	30,5
30	330	4,2	29,8	4,5	31,9	5,1	36,2
31	340	4,1	29,1	4,5	31,9	4,9	34,8
32	360	4,1	29,1	4,5	31,9	3,9	27,7
33	380	4,1	29,1	4,3	30,5	4,3	30,5
34	400	4,1	29,1	4,1	29,1	3,7	26,2
35	420	4,1	29,1	4,3	30,5	3,7	26,2
36	440	4,1	29,1	4,1	29,1	4,1	29,1
37	460	4,0	28,4	4,4	31,2	3,5	24,8
38	480	3,9	27,7	4,6	32,6	3,9	27,7
39	500	4,0	28,4	4,2	29,8	3,8	26,9
40	520	4,0	28,4	4,1	29,1	3,9	27,7
41	540	3,8	26,9	4,3	30,5	3,9	27,7
42	560	3,7	26,2	4,3	30,5	4,1	29,1
43	580	3,9	27,7	4,6	32,6	4,0	28,4
44	600	3,8	26,9	4,1	29,1	3,8	26,9
45	630	3,9	27,7	4,6	32,6	4,0	28,4
46	660	3,9	27,7	4,3	30,5	4,0	28,4

FIGURA 65. ENSAYO DE TRAZADORES  
CANAL DISTRIBUIDOR A SEDIMENTADORES  
PLANTA N 1  
PUNTO DE MUESTREO 5



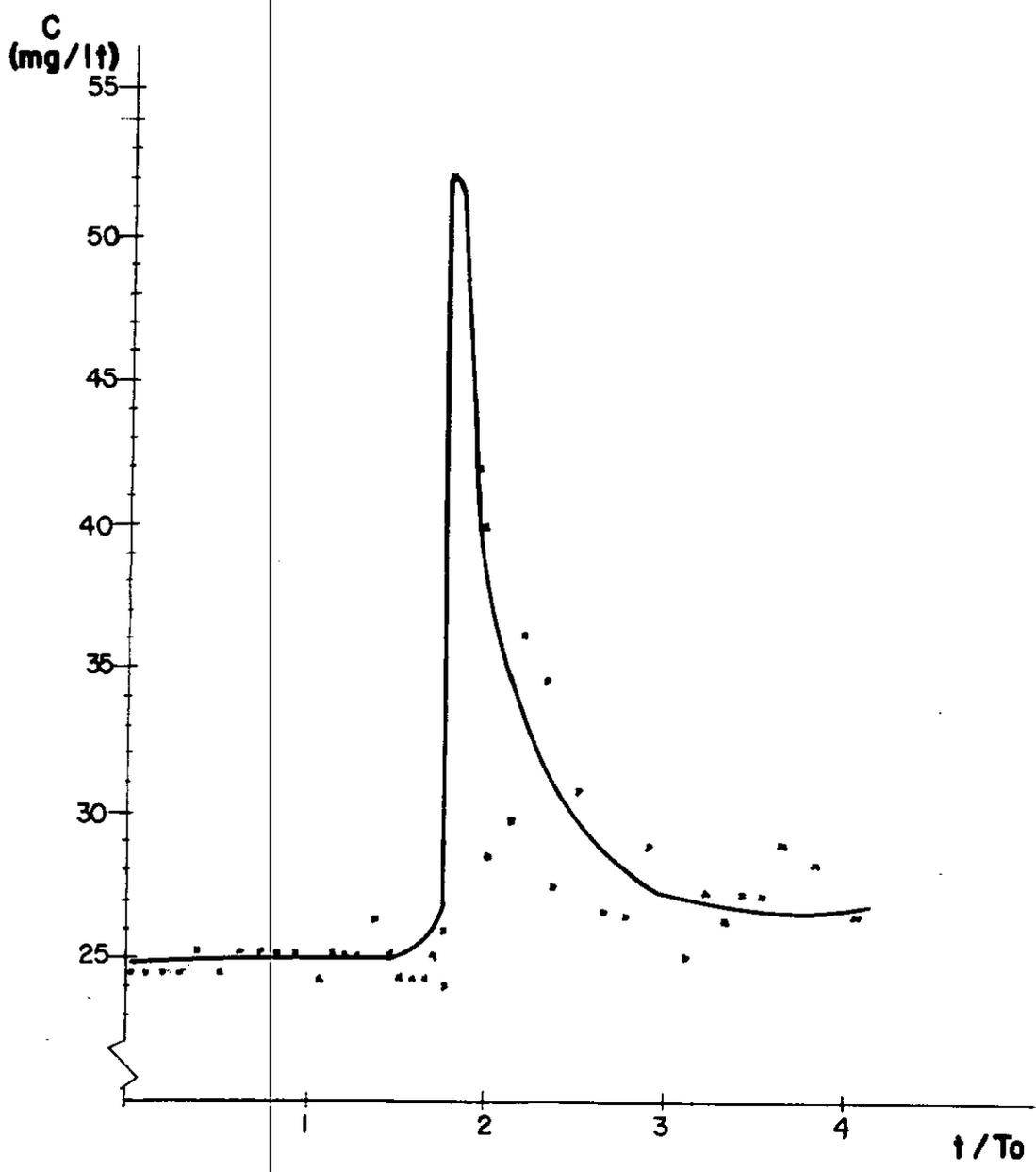
ENERO 30/90

FIGURA 66. ENSAYO DE TRAZADORES  
CANAL DISTRIBUIDOR A SEDIMENTADORES  
PLANTA I  
PUNTO DE MUESTREO 6



ENERO 30/90

FIGURA 67. ENSAYO DE TRAZADORES  
CANAL DISTRIBUIDOR A SEDIMENTADORES  
PLANTA I  
PUNTO DE MUESTREO 7



ENERO 30/90

TABLA 78. Resultados de ensayo de trazadores en canales distribuidores de agua a sedimentadores.  
 Planta dos. Puntos 1 y 2.  $T_0 = 360$  segundos

Número orden	t (s)	t/T <sub>0</sub>	PUNTO 1				PUNTO 2			
			C-C <sub>0</sub> mg/lit	Σ(C-C <sub>0</sub> )	F(t)	1-F(t)	C-C <sub>0</sub> mg/lit	Σ(C-C <sub>0</sub> )	F(t)	1-F(t)
1	0	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,40	0,40	0,00	1,00
2	20	0,06	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,40	0,00	1,00
3	40	0,11	0,30	0,30	0,00	1,00	0,00	0,40	0,00	1,00
4	60	0,17	0,40	0,70	0,00	1,00	0,00	0,40	0,00	1,00
5	80	0,22	0,60	1,30	0,00	1,00	0,00	0,40	0,00	1,00
6	100	0,28	1,40	2,70	0,01	0,99	0,00	0,40	0,00	1,00
7	120	0,33	2,60	5,30	0,02	0,98	0,30	0,70	0,00	1,00
8	140	0,39	10,40	15,70	0,05	0,95	1,20	1,90	0,00	1,00
9	160	0,44	20,00	35,70	0,12	0,88	2,60	4,50	0,01	0,99
10	180	0,50	19,20	54,90	0,18	0,82	9,60	14,10	0,02	0,98
11	200	0,56	10,80	65,70	0,22	0,78	14,40	28,50	0,04	0,96
12	220	0,61	13,60	79,30	0,26	0,74	19,20	47,70	0,07	0,93
13	240	0,67	15,60	94,90	0,32	0,68	24,60	72,30	0,11	0,89
14	260	0,72	12,00	106,90	0,36	0,64	26,60	98,90	0,15	0,85
15	280	0,78	10,40	117,30	0,39	0,61	29,10	128,00	0,19	0,81
16	300	0,83	9,60	126,90	0,42	0,58	31,40	159,40	0,24	0,76
17	320	0,89	9,00	135,90	0,45	0,55	33,80	193,20	0,29	0,71
18	340	0,94	8,60	144,50	0,48	0,52	36,10	229,30	0,35	0,65
19	360	1,00	8,40	152,90	0,51	0,49	39,00	268,30	0,41	0,59
20	380	1,06	8,10	161,00	0,54	0,46	39,80	308,10	0,47	0,53
21	400	1,11	7,80	168,80	0,56	0,44	37,90	346,00	0,52	0,48
22	420	1,17	7,60	176,40	0,59	0,41	33,80	379,80	0,58	0,42
23	440	1,22	7,40	183,80	0,61	0,39	30,60	410,40	0,62	0,38
24	460	1,28	7,20	191,00	0,63	0,37	26,40	436,80	0,66	0,34
25	480	1,33	7,10	198,10	0,66	0,34	23,20	460,00	0,70	0,30
26	500	1,39	7,00	205,10	0,68	0,32	20,40	480,40	0,73	0,27
27	520	1,44	6,80	211,90	0,70	0,30	17,80	498,20	0,76	0,24
28	540	1,50	6,80	218,70	0,73	0,27	16,10	514,30	0,78	0,22
29	560	1,56	6,60	225,30	0,75	0,25	14,60	528,90	0,80	0,20
30	580	1,61	6,50	231,80	0,77	0,23	13,50	542,40	0,82	0,18
31	600	1,67	6,40	238,20	0,79	0,21	12,80	555,20	0,84	0,16
32	620	1,72	6,20	244,40	0,81	0,19	12,00	567,20	0,86	0,14
33	640	1,78	6,20	250,60	0,83	0,17	11,30	578,50	0,88	0,12
34	660	1,83	6,00	256,60	0,85	0,15	10,90	589,40	0,89	0,11
35	680	1,89	5,80	262,40	0,87	0,13	10,30	599,70	0,91	0,09
36	700	1,94	5,70	268,10	0,89	0,11	9,80	609,50	0,92	0,08
37	720	2,00	5,60	273,70	0,91	0,09	9,40	618,90	0,94	0,06
38	740	2,06	5,60	279,30	0,93	0,07	8,90	627,80	0,95	0,05
39	760	2,11	5,50	284,80	0,95	0,05	8,50	636,30	0,96	0,04
40	780	2,17	5,40	290,20	0,96	0,04	8,10	644,40	0,98	0,02
41	800	2,22	5,40	295,60	0,98	0,02	7,80	652,20	0,99	0,01
42	820	2,28	5,30	300,90	1,00	0,00	7,40	659,60	1,00	0,00
43	840	2,33	5,20	300,80	1,00	0,00	7,40	659,60	1,00	0,00

FIGURA 68. ENSAYO DE TRAZADORES  
CANAL DISTRIBUIDOR A SEDIMENTADORES  
PLANTA 2  
PUNTO DE MUESTREO 1

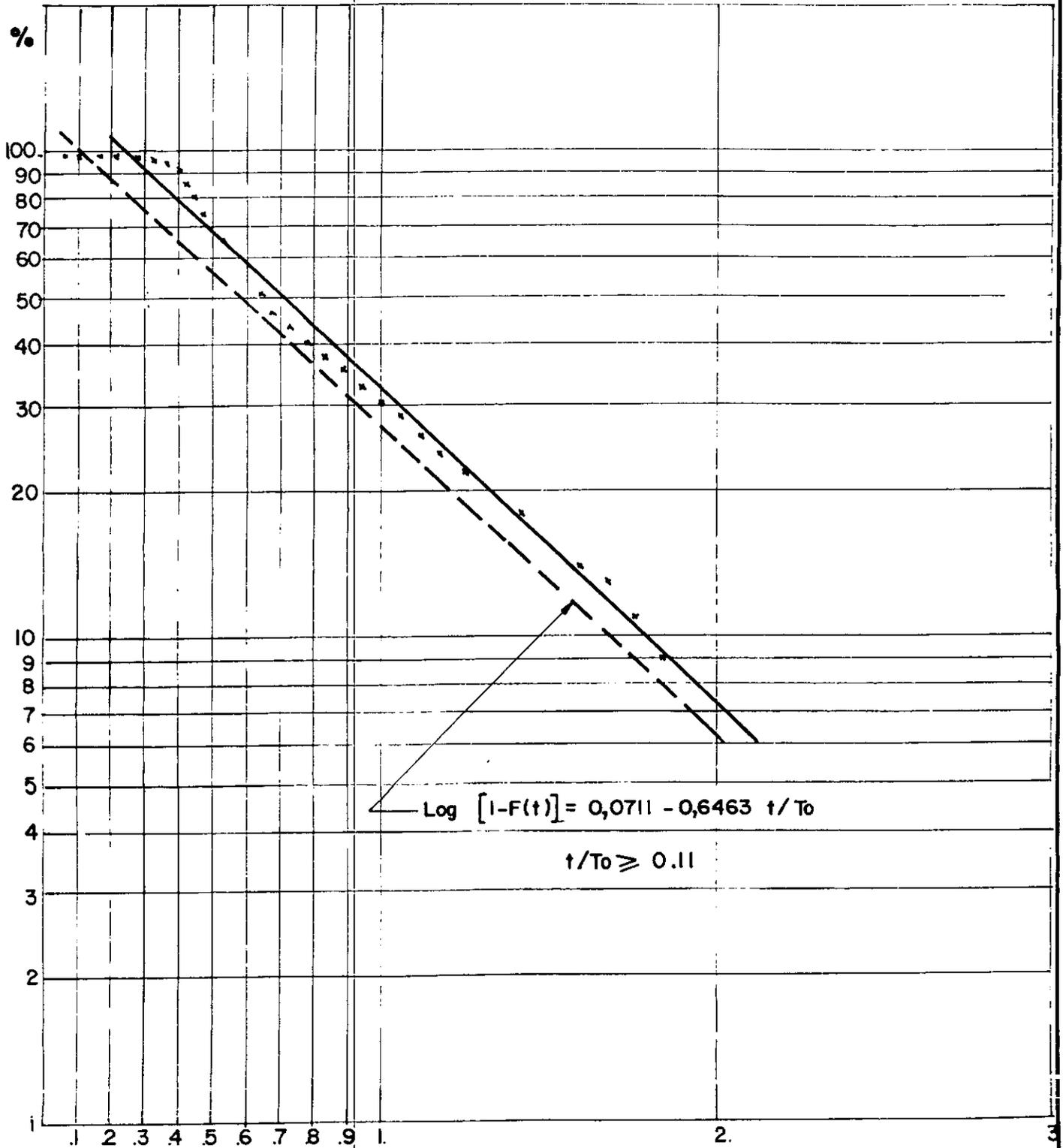


FIGURA 69. ENSAYO DE TRAZADORES  
CANAL DISTRIBUIDOR A SEDIMENTADORES  
PLANTA 2  
PUNTO DE MUESTREO 2

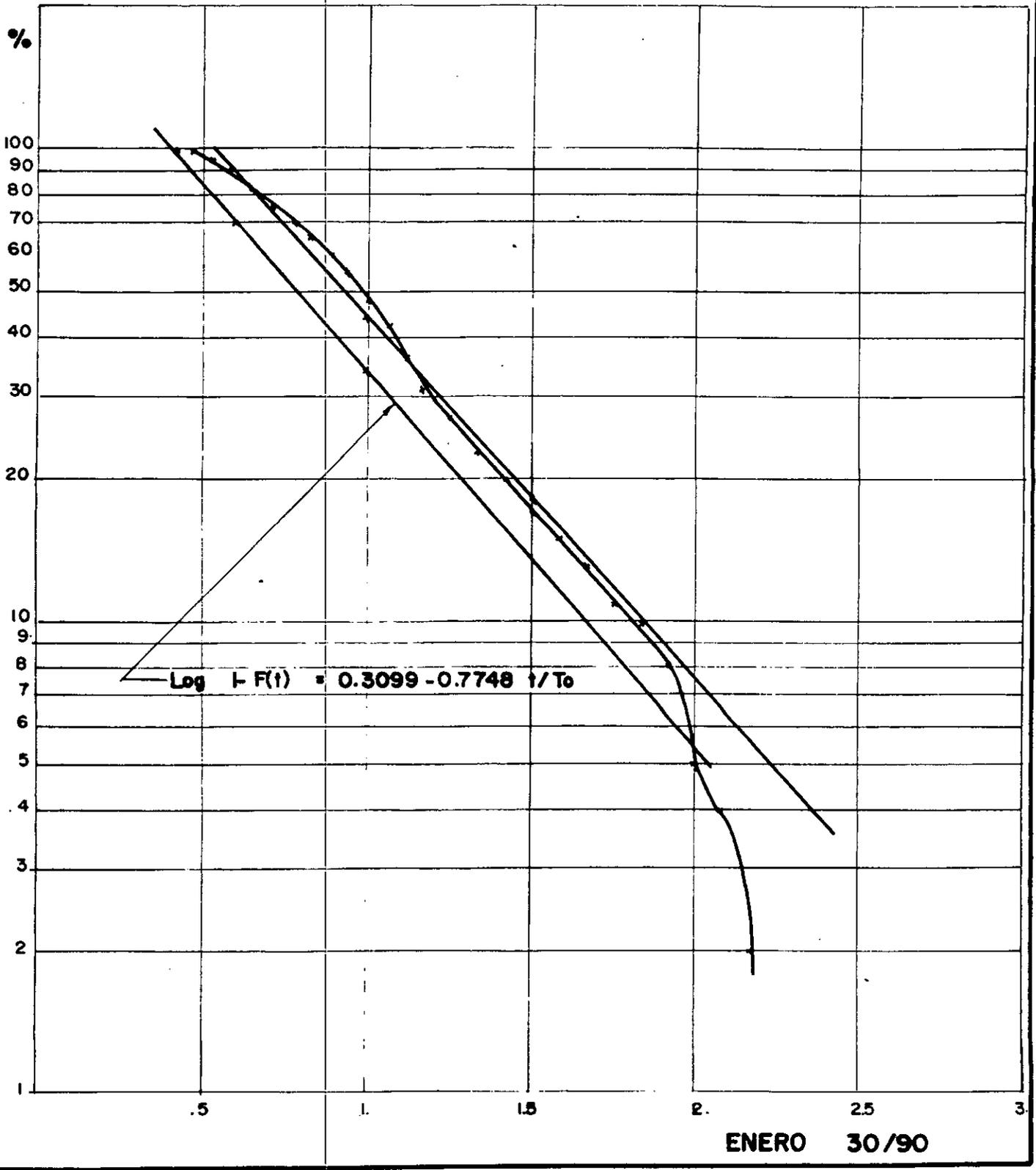


TABLA 79. Resultados de ensayo de trazadores en canales distribuidores de agua a sedimentadores.  
 Planta dos. Puntos 3 y 4.  $T_0 = 360$  s

Número orden	t (s)	t/T <sub>0</sub>	PUNTO 3				PUNTO 4			
			C-C <sub>0</sub> mg/lit	Σ(C-C <sub>0</sub> )	F(t)	1-F(t)	C-C <sub>0</sub> mg/lit	Σ(C-C <sub>0</sub> )	F(t)	1-F(t)
1	0	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00
2	20	0,06	1,00	1,00	0,01	0,99	0,70	0,70	0,00	1,00
3	40	0,11	1,00	2,00	0,01	0,99	3,00	3,70	0,02	0,98
4	60	0,17	1,00	3,00	0,02	0,98	27,00	30,70	0,18	0,82
5	80	0,22	1,00	4,00	0,02	0,98	26,20	56,90	0,34	0,66
6	100	0,28	1,00	5,00	0,03	0,97	18,40	75,30	0,45	0,55
7	120	0,33	1,00	6,00	0,03	0,97	14,80	90,10	0,54	0,46
8	140	0,39	1,00	7,00	0,04	0,96	11,10	101,20	0,61	0,39
9	160	0,44	1,00	8,00	0,04	0,96	8,80	110,00	0,66	0,34
10	180	0,50	1,00	9,00	0,05	0,95	6,40	116,40	0,70	0,30
11	200	0,56	1,00	10,00	0,05	0,95	5,10	121,50	0,73	0,27
12	220	0,61	1,00	11,00	0,06	0,94	4,40	125,90	0,76	0,24
13	240	0,67	1,10	12,10	0,06	0,94	3,70	129,60	0,78	0,22
14	260	0,72	1,20	13,30	0,07	0,93	3,40	133,00	0,80	0,20
15	280	0,78	1,40	14,70	0,07	0,93	3,00	136,00	0,82	0,18
16	300	0,83	1,60	16,30	0,08	0,92	2,80	138,80	0,84	0,16
17	320	0,89	2,30	18,60	0,09	0,91	2,50	141,30	0,85	0,15
18	340	0,94	5,20	23,80	0,12	0,88	2,40	143,70	0,87	0,13
19	360	1,00	6,40	30,20	0,15	0,85	2,20	145,90	0,88	0,12
20	380	1,06	7,30	37,50	0,19	0,81	2,00	147,90	0,89	0,11
21	400	1,11	7,80	45,30	0,23	0,77	1,80	149,70	0,90	0,10
22	420	1,17	8,40	53,70	0,27	0,73	1,60	151,30	0,91	0,09
23	440	1,22	8,80	62,50	0,32	0,68	1,50	152,80	0,92	0,08
24	460	1,28	9,40	71,90	0,36	0,64	1,40	154,20	0,93	0,07
25	480	1,33	9,90	81,80	0,41	0,59	1,20	155,40	0,94	0,06
26	500	1,39	9,50	91,30	0,46	0,54	1,10	156,50	0,94	0,06
27	520	1,44	9,20	100,50	0,51	0,49	1,00	157,50	0,95	0,05
28	540	1,50	8,60	109,10	0,55	0,45	0,90	158,40	0,95	0,05
29	560	1,56	8,20	117,30	0,59	0,41	0,80	159,20	0,96	0,04
30	580	1,61	7,60	124,90	0,63	0,37	0,70	159,90	0,96	0,04
31	600	1,67	7,10	132,00	0,67	0,33	0,60	160,50	0,97	0,03
32	620	1,72	6,60	138,60	0,70	0,30	0,60	161,10	0,97	0,03
33	640	1,78	6,40	145,00	0,73	0,27	0,60	161,70	0,97	0,03
34	660	1,83	6,10	151,10	0,77	0,23	0,50	162,20	0,98	0,02
35	680	1,89	5,80	156,90	0,79	0,21	0,50	162,70	0,98	0,02
36	700	1,94	5,60	162,50	0,82	0,18	0,50	163,20	0,98	0,02
37	720	2,00	5,40	167,90	0,85	0,15	0,50	163,70	0,99	0,01
38	740	2,06	5,30	173,20	0,88	0,12	0,50	164,20	0,99	0,01
39	760	2,11	5,10	178,30	0,90	0,10	0,40	164,60	0,99	0,01
40	780	2,17	5,00	183,30	0,93	0,07	0,40	165,00	0,99	0,01
41	800	2,22	5,00	188,30	0,95	0,05	0,40	165,40	1,00	0,00
42	820	2,28	4,90	193,20	0,98	0,02	0,40	165,80	1,00	0,00
43	840	2,33	4,20	197,40	1,00	0,00	0,30	166,10	1,00	0,00

FIGURA 70. ENSAYO DE TRAZADORES  
CANAL DISTRIBUIDOR A SEDIMENTADORES  
PLANTA 2  
PUNTO DE MUESTREO 3

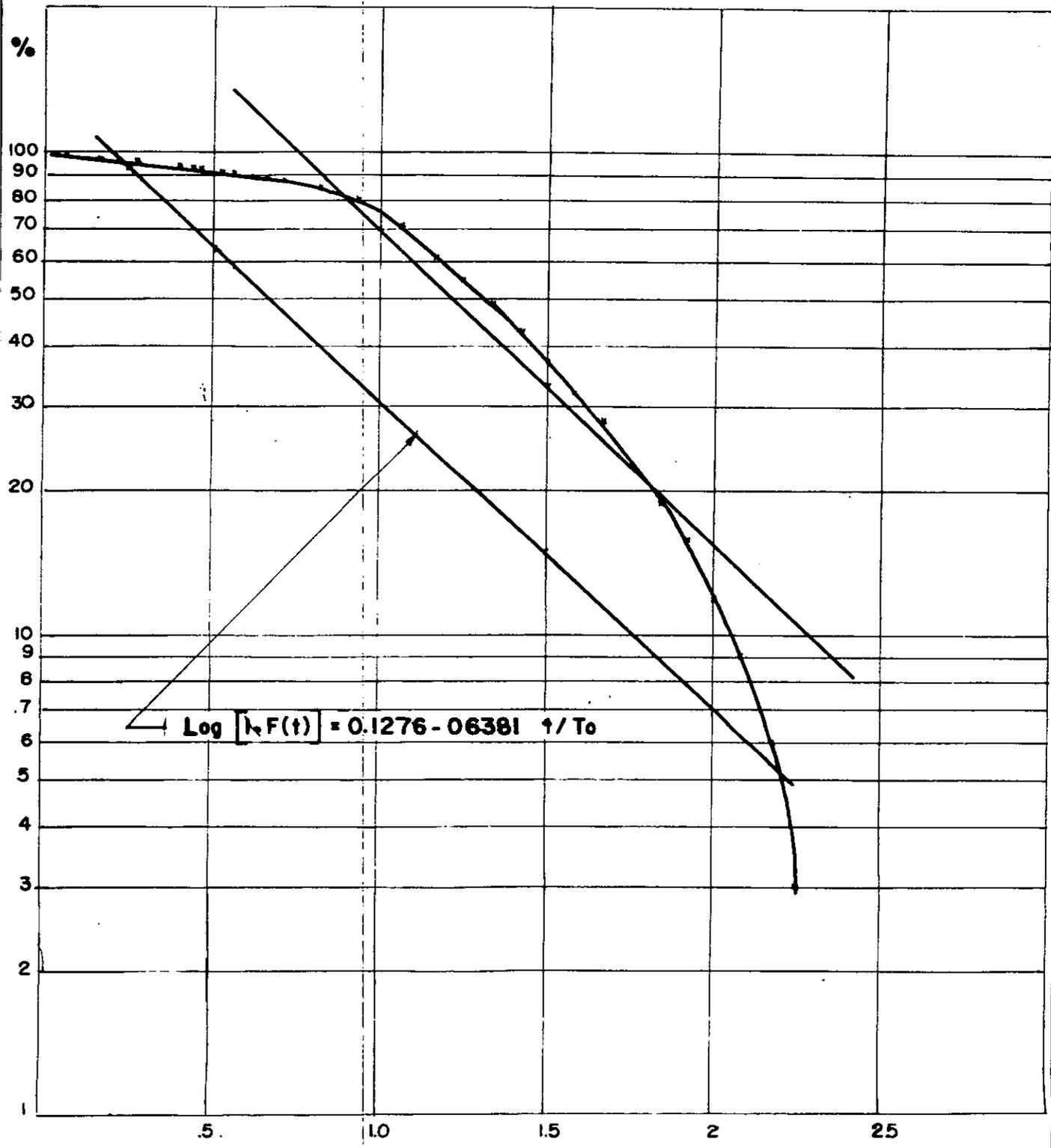
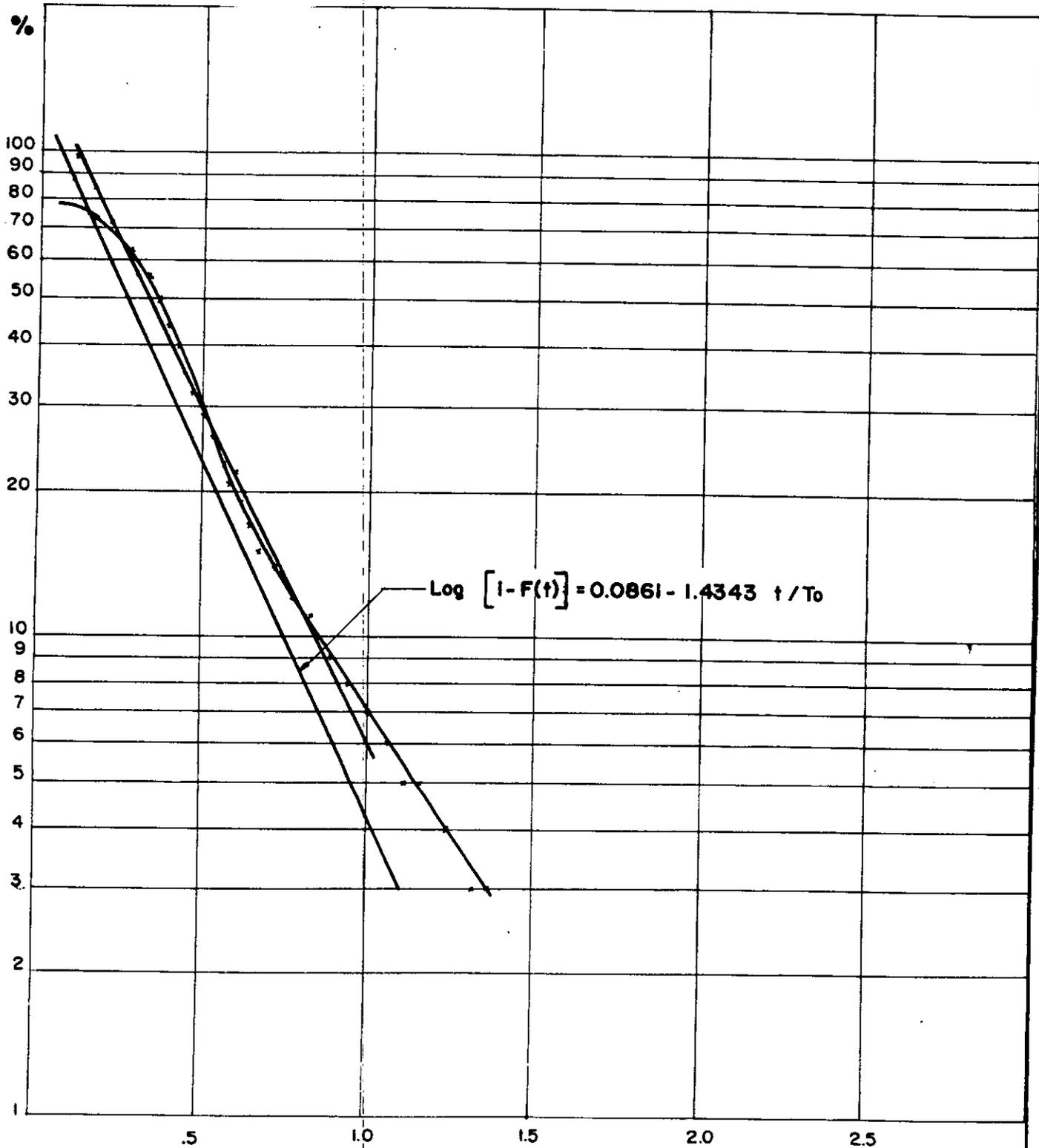


FIGURA 71. ENSAYO DE TRAZADORES  
CANAL DISTRIBUIDOR A SEDIMENTADORES  
PLANTA 2  
PUNTO DE MUESTREO 4



$\text{Log} [1 - F(t)] = 0.0861 - 1.4343 t / T_0$

**TABLA 80.** Resultados de ensayo de trazadores en canales distribuidores de agua a sedimentadores de la Planta uno. Puntos 5, 6 y 7.  $T_0 = 150$  segundos

Número orden	t (s)	t/T <sub>0</sub>	PUNTO 5				PUNTO 6				PUNTO 7			
			C-C <sub>0</sub> mg/lit	Σ(C-C <sub>0</sub> ) mg/lit	F(t)	1-F(t)	C-C <sub>0</sub> mg/lit	Σ(C-C <sub>0</sub> ) mg/lit	F(t)	1-F(t)	C-C <sub>0</sub> mg/lit	Σ(C-C <sub>0</sub> ) mg/lit	F(t)	1-F(t)
1	0	0,00	0,0	0,0	0,00	1,00	0,0	0,0	0,00	1,00	0,3	0,3	0,00	1,00
2	20	0,13	0,2	0,2	0,00	1,00	0,8	0,8	0,00	1,00	0,3	0,6	0,01	0,99
3	40	0,27	0,4	0,6	0,00	1,00	1,4	2,2	0,01	0,99	0,4	1,0	0,01	0,99
4	60	0,40	0,6	1,2	0,00	1,00	1,4	3,6	0,01	0,99	0,4	1,4	0,01	0,99
5	80	0,53	1,4	2,6	0,01	0,99	1,6	5,2	0,02	0,98	0,5	1,9	0,02	0,98
6	100	0,67	35,9	38,5	0,11	0,89	2,5	7,7	0,02	0,98	0,5	2,4	0,02	0,98
7	120	0,80	106,4	144,9	0,42	0,58	73,4	81,1	0,25	0,75	0,6	3,0	0,03	0,97
8	140	0,93	42,4	187,3	0,55	0,45	13,9	95,0	0,29	0,71	0,6	3,6	0,03	0,97
9	160	1,07	29,4	216,7	0,63	0,37	39,9	134,9	0,42	0,58	0,7	4,3	0,04	0,96
10	180	1,20	21,9	238,6	0,70	0,30	29,1	164,0	0,50	0,50	0,7	5,0	0,04	0,96
11	200	1,33	15,4	254,0	0,74	0,26	19,4	183,4	0,56	0,44	0,7	5,7	0,05	0,95
12	220	1,47	10,4	264,4	0,77	0,23	14,9	198,3	0,61	0,39	0,7	6,4	0,06	0,94
13	240	1,60	8,5	272,9	0,80	0,20	11,4	209,7	0,65	0,35	0,8	7,2	0,06	0,94
14	260	1,73	7,1	280,0	0,82	0,18	8,9	218,6	0,67	0,33	1,2	8,4	0,07	0,93
15	280	1,87	6,4	286,4	0,84	0,16	7,4	226,0	0,70	0,30	18,4	26,8	0,24	0,76
16	300	2,00	5,7	292,1	0,85	0,15	6,7	232,7	0,72	0,28	12,9	39,7	0,35	0,65
17	320	2,13	5,2	297,3	0,87	0,13	6,2	238,9	0,74	0,26	10,0	49,7	0,44	0,56
18	340	2,27	5,0	302,3	0,88	0,12	5,9	244,8	0,75	0,25	7,5	57,2	0,50	0,50
19	360	2,40	4,4	306,7	0,89	0,11	5,6	250,4	0,77	0,23	5,4	62,6	0,55	0,45
20	380	2,53	4,1	310,8	0,91	0,09	5,4	255,8	0,79	0,21	4,6	67,2	0,59	0,41
21	400	2,67	3,7	314,5	0,92	0,08	5,3	261,1	0,80	0,20	4,2	71,4	0,63	0,37
22	420	2,80	3,4	317,9	0,93	0,07	4,9	266,0	0,82	0,18	3,9	75,3	0,66	0,34
23	440	2,93	2,9	320,8	0,94	0,06	4,9	270,9	0,83	0,17	3,6	78,9	0,70	0,30
24	460	3,07	2,6	323,4	0,94	0,06	4,9	275,8	0,85	0,15	3,4	82,3	0,73	0,27
25	480	3,20	2,4	325,8	0,95	0,05	4,9	280,7	0,86	0,14	3,2	85,5	0,75	0,25
26	500	3,33	1,9	327,7	0,96	0,04	4,9	285,6	0,88	0,12	3,1	88,6	0,78	0,22
27	520	3,47	1,9	329,6	0,96	0,04	4,9	290,5	0,89	0,11	3,1	91,7	0,81	0,19
28	540	3,60	1,9	331,5	0,97	0,03	4,9	295,4	0,91	0,09	3,1	94,8	0,84	0,16
29	560	3,73	1,9	333,4	0,97	0,03	4,9	300,3	0,92	0,08	3,1	97,9	0,86	0,14
30	580	3,87	1,9	335,3	0,98	0,02	4,9	305,2	0,94	0,06	3,1	101,0	0,89	0,11
31	600	4,00	1,9	337,2	0,98	0,02	4,9	310,1	0,95	0,05	3,1	104,1	0,92	0,08
32	620	4,13	1,9	339,1	0,99	0,01	4,9	315,0	0,97	0,03	3,1	107,2	0,95	0,05
33	640	4,27	1,9	341,0	0,99	0,01	4,9	319,9	0,98	0,02	3,1	110,3	0,97	0,03
34	660	4,40	1,9	342,9	1,00	0,00	4,9	324,8	1,00	0,00	3,1	113,4	1,00	0,00

**FIGURA 72. ENSAYO DE TRAZADORES  
CANAL DISTRIBUIDOR A SEDIMENTADORES.  
PLANTA I  
PUNTO DE MUESTREO 5**

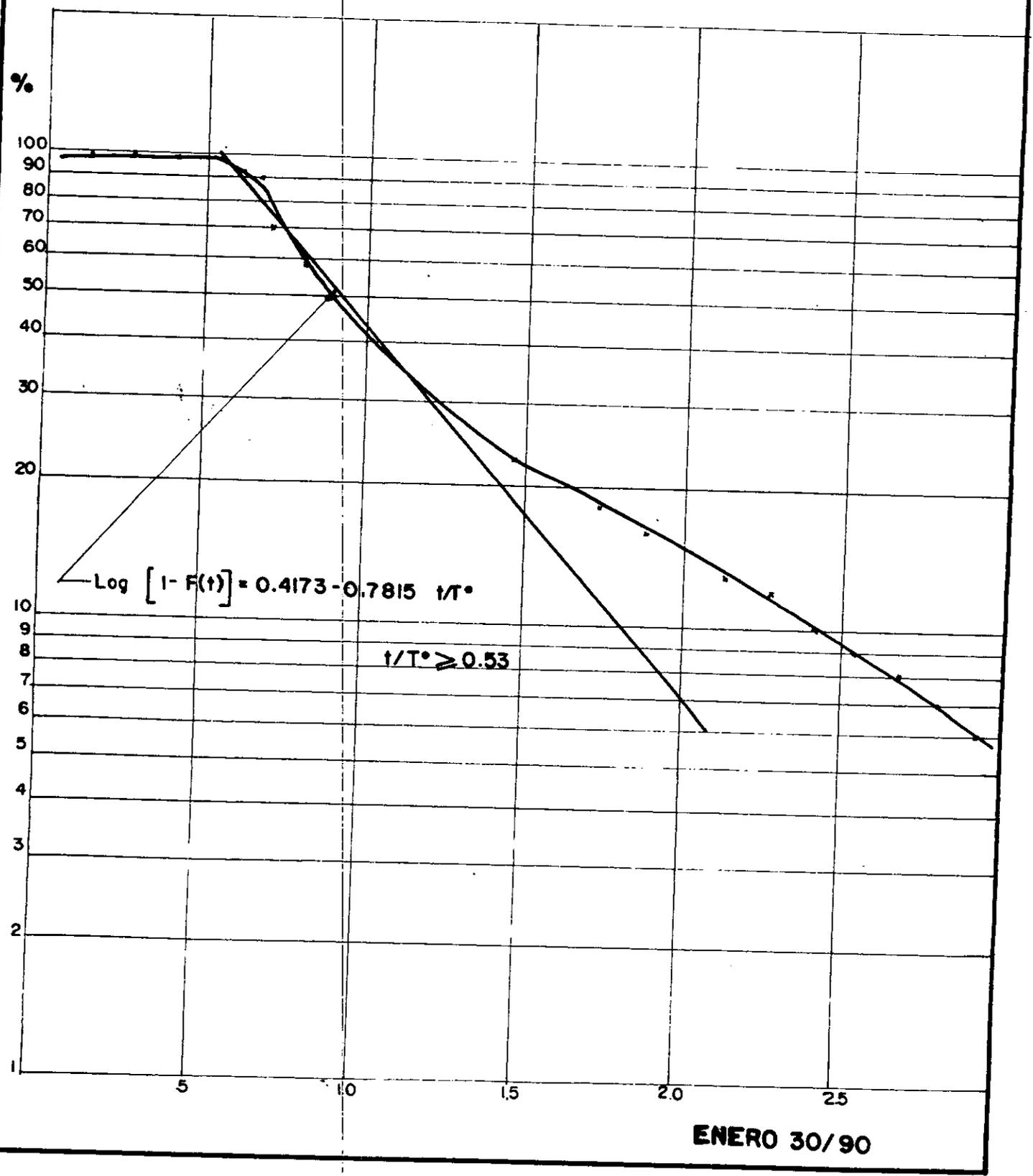


FIGURA 73. ENSAYO DE TRAZADORES  
CANAL DISTRIBUIDOR A SEDIMENTADORES  
PLANTA I  
PUNTO DE MUESTREO 6

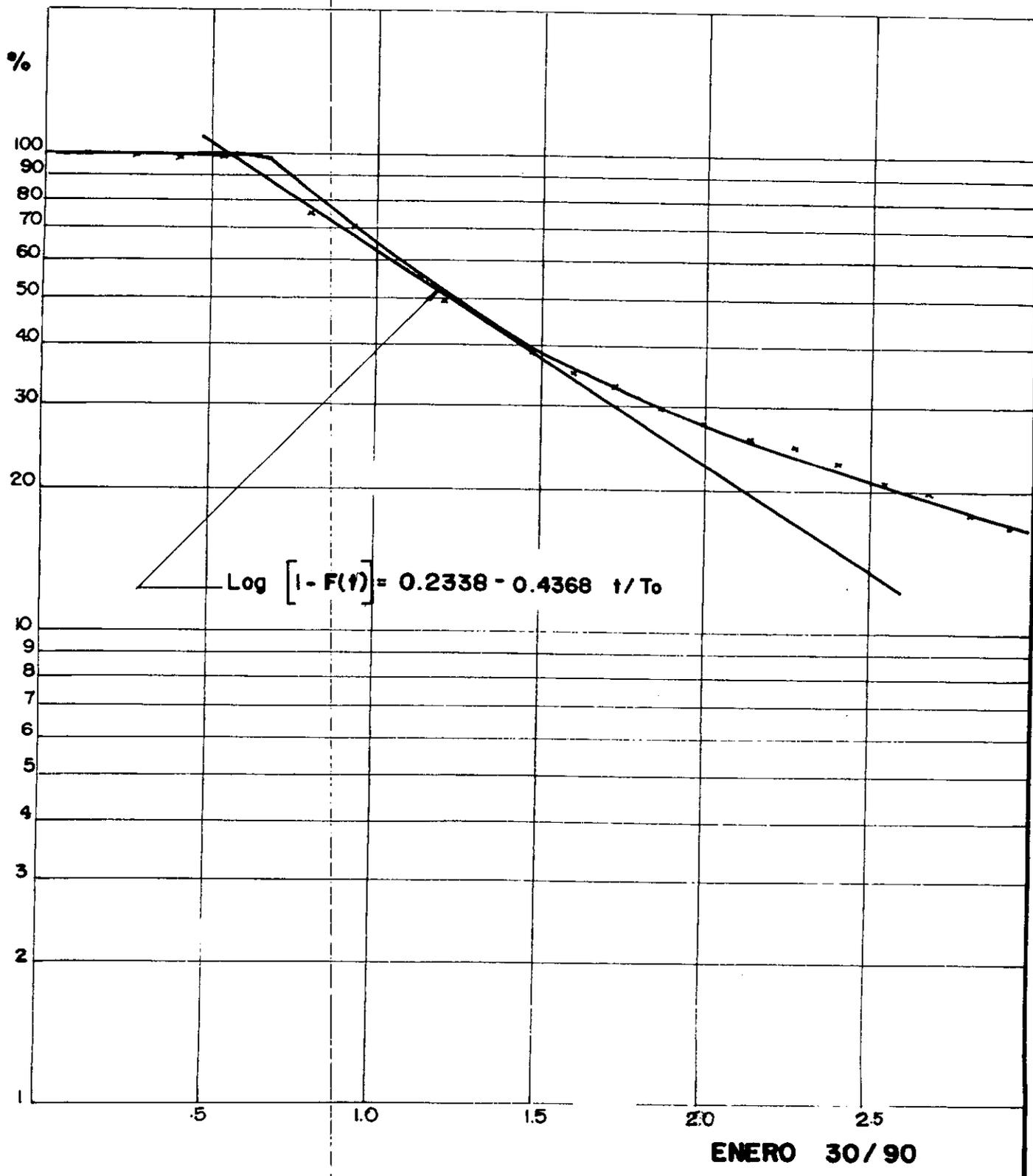
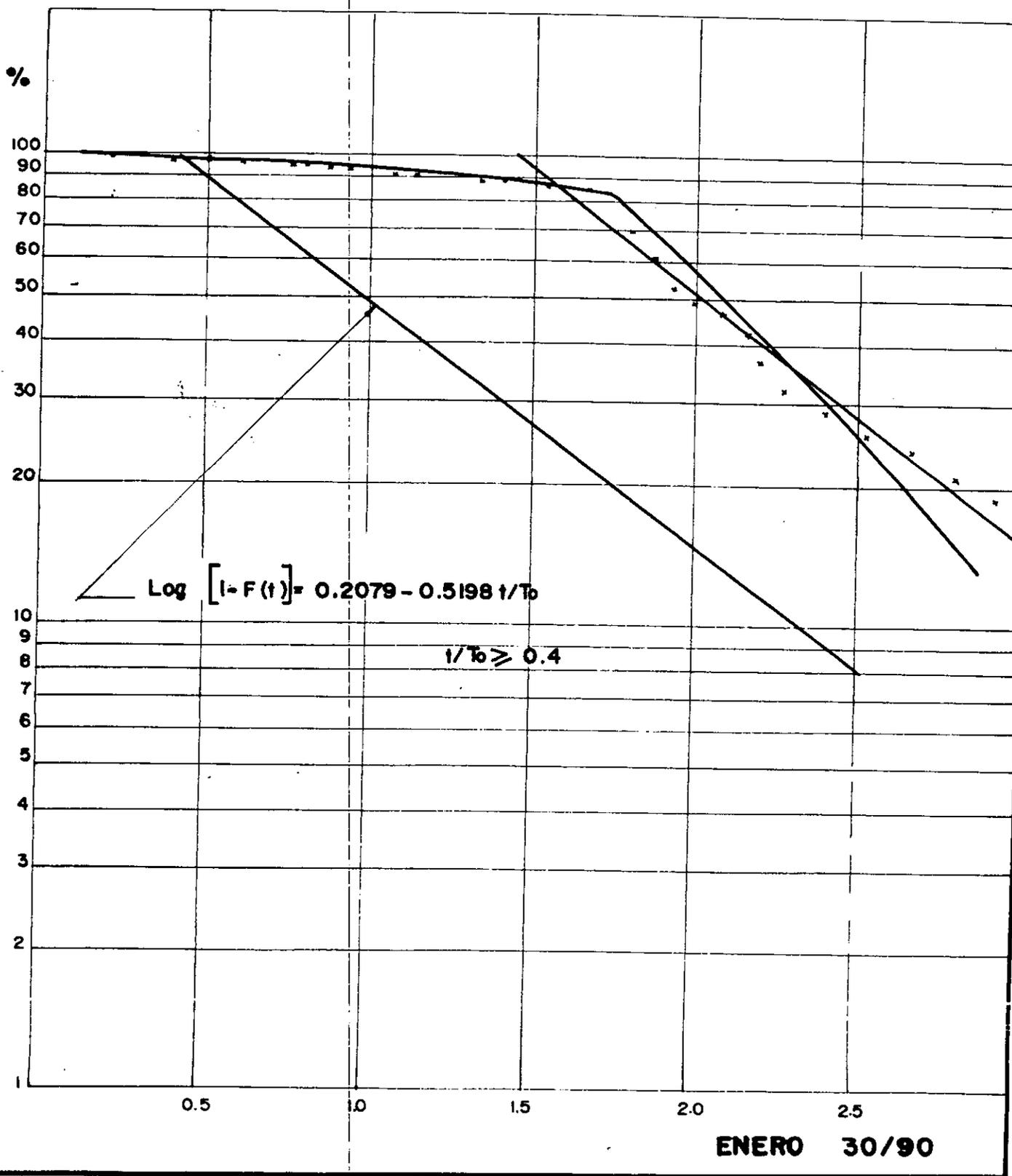


FIGURA 74. ENSAYO DE TRAZADORES  
 CANAL DISTRIBUIDOR A SEDIMENTADORES  
 PLANTA 1  
 PUNTO DE MUESTREO 7



A partir de los datos de este ensayo se determinan las proporciones en que se distribuye el agua floculada a cada uno de los sedimentadores. Tabla 81.

**TABLA 81.** Distribución de caudales a los sedimentadores de las plantas uno y dos, en Ene 30/90.

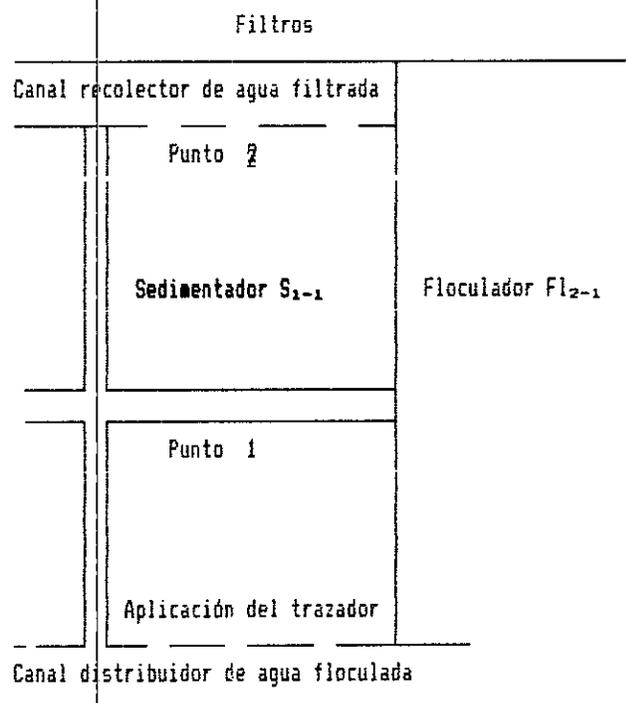
Unidad	Punto	$\Sigma(C - C_0)$ mg/l	%	Caudal m <sup>3</sup> /s	Caudal m <sup>3</sup> /día
S <sub>1-1</sub>	5	342,9	43,9	0,224	19.382
S <sub>2-1</sub>	6	324,8	41,6	0,213	18.366
S <sub>3-1</sub>	7	113,4	14,5	0,074	6.402
Totales		781,1	100,0	0,511	44.150
S <sub>1-2</sub>	3	197,4	14,9	0,031	2.691
S <sub>2-2</sub>	2	659,6	49,8	0,104	8.993
S <sub>3-2</sub>	1	300,8	22,7	0,047	4.099
Planta 1	4	166,1	12,6	0,026	2.275
Totales		1.323,9	100,0	0,208	18.058

Como puede observarse esta distribución esta muy lejos de ser la equitativa que debería darse. No obstante la causa de esto no es la geometría del canal distribuidor sino que se debe a las distintas condiciones extremas de operación a que se llega tanto en los sedimentadores como en la batería filtrante.

Es lo más frecuente que sea la planta uno la que envíe agua a la planta dos, ya que las unidades de esta última

se operan con menos diligencia que las de la planta uno, permitiéndose la acumulación excesiva de lodos en sedimentadores y la colmatación de los filtros. El hecho de que los canales de agua floculada de ambas plantas esten comunicados favorece la ocurrencia de estas situaciones.

**Condiciones hidráulicas en sedimentadores.** Para determinar el comportamiento hidráulico del sedimentador se ejecutó un ensayo de trazadores similar, aplicando el trazador en la zona de entrada del mismo y tomando muestras en los puntos medio y final. En la siguiente figura se muestra un esquema del sedimentador seleccionado para la prueba y la localización de los puntos de toma de muestras.



Los datos del ensayo estan en la Tabla 82 y en las Figuras 75 y 76.

Se tomaron como datos iniciales el caudal estimado de ensayos anteriores correspondiente al sedimentador uno de la planta de tratamiento número uno. Al momento del ensayo esta planta estaba recibiendo aproximadamente 469 litros por segundo de los cuales el sedimentador en estudio tomaba un 43,9 %, es decir que esta trabajando con un caudal estimado en 208 litros por segundo.

El volumen útil del sedimentador se estimó en 1.850,0 m<sup>3</sup>. Así resultaron tiempos teóricos de detención en los puntos de toma de muestras, así:

$$T_{o1} = \frac{V}{Q} = \frac{925,0 \text{ m}^3}{0,208 \text{ m}^3/\text{s} \times 60 \text{ s/min}} = 74,1 \text{ min.}$$

$$T_{o2} = \frac{V}{Q} = \frac{1.850,0 \text{ m}^3}{0,208 \text{ m}^3/\text{s} \times 60 \text{ s/min}} = 148,2 \text{ min.}$$

Se hace el análisis de la curva de concentración de trazador en el tiempo y se resumen las principales características de flujo en la unidad. (Ver Tabla 83 y Figuras 77 y 78).

TABLA 82. Datos ensayo de trazadores en el sedimentador uno de la planta uno. (S<sub>1-1</sub>). Feb 3/90.

Número de orden de muestra	t min	PUNTO 1			PUNTO 2		
		t/T <sub>0</sub>	AgNO <sub>3</sub> ml	Cloruros mg/lit	t/T <sub>0</sub>	AgNO <sub>3</sub> ml	Cloruros mg/lit
1	0	0,00	3,7	26,2	0,00	3,6	25,5
2	10	0,14	3,9	27,7	0,07	3,7	26,2
3	20	0,27	4,0	28,4	0,14	3,6	25,5
4	30	0,41	4,4	31,2	0,20	3,7	26,2
5	40	0,54	6,4	45,4	0,27	3,9	27,7
6	50	0,68	6,3	44,7	0,34	5,6	39,7
7	60	0,81	6,1	43,3	0,41	5,2	36,9
8	65	0,88	7,1	50,4	0,44	6,4	45,4
9	70	0,95	7,0	49,6	0,47	6,3	44,7
10	75	1,01	7,9	56,0	0,51	6,1	43,3
11	80	1,08	7,2	51,1	0,54	6,3	44,7
12	85	1,15	7,4	52,5	0,57	7,2	51,1
13	90	1,22	4,4	31,2	0,61	8,2	58,2
14	95	1,28	7,5	53,2	0,64	7,2	51,1
15	100	1,35	7,6	53,9	0,68	7,1	50,4
16	105	1,42	7,5	53,2	0,71	7,5	53,2
17	110	1,49	7,2	51,1	0,74	7,4	52,5
18	115	1,55	7,0	49,6	0,78	7,3	51,8
19	120	1,62	7,1	50,4	0,81	7,9	56,0
20	130	1,76	7,1	50,4	0,88	7,5	53,2
21	140	1,89	7,0	49,6	0,95	7,5	53,2
22	150	2,03	6,7	47,5	1,01	7,2	51,1
23	165	2,23	6,5	46,1	1,11	7,1	50,4
24	180	2,43	6,2	44,0	1,22	6,9	48,9
25	200	2,70	6,3	44,7	1,35	6,3	44,7
26	220	2,97	6,1	43,3	1,49	6,4	45,4
27	240	3,24	5,8	41,1	1,62	6,1	43,3
28	260	3,51	5,4	38,3	1,76	5,8	41,1
29	280	3,78	5,2	36,9	1,89	5,7	40,4
30	300	4,05	5,4	38,3	2,03	5,7	40,4
31	330	4,46	4,9	34,8	2,23	5,3	37,6
32	720	9,73	4,5	31,9	4,86	4,9	34,8

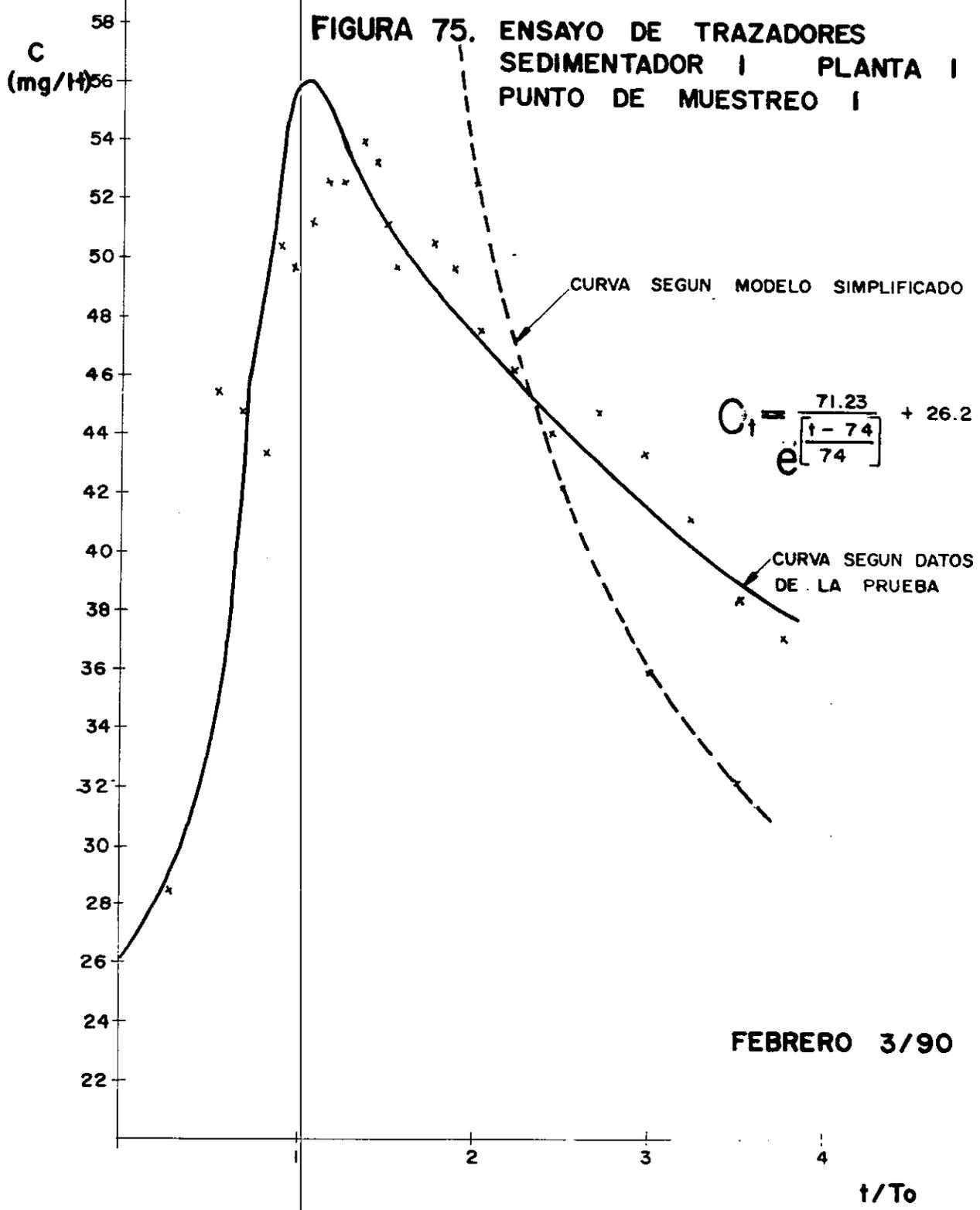
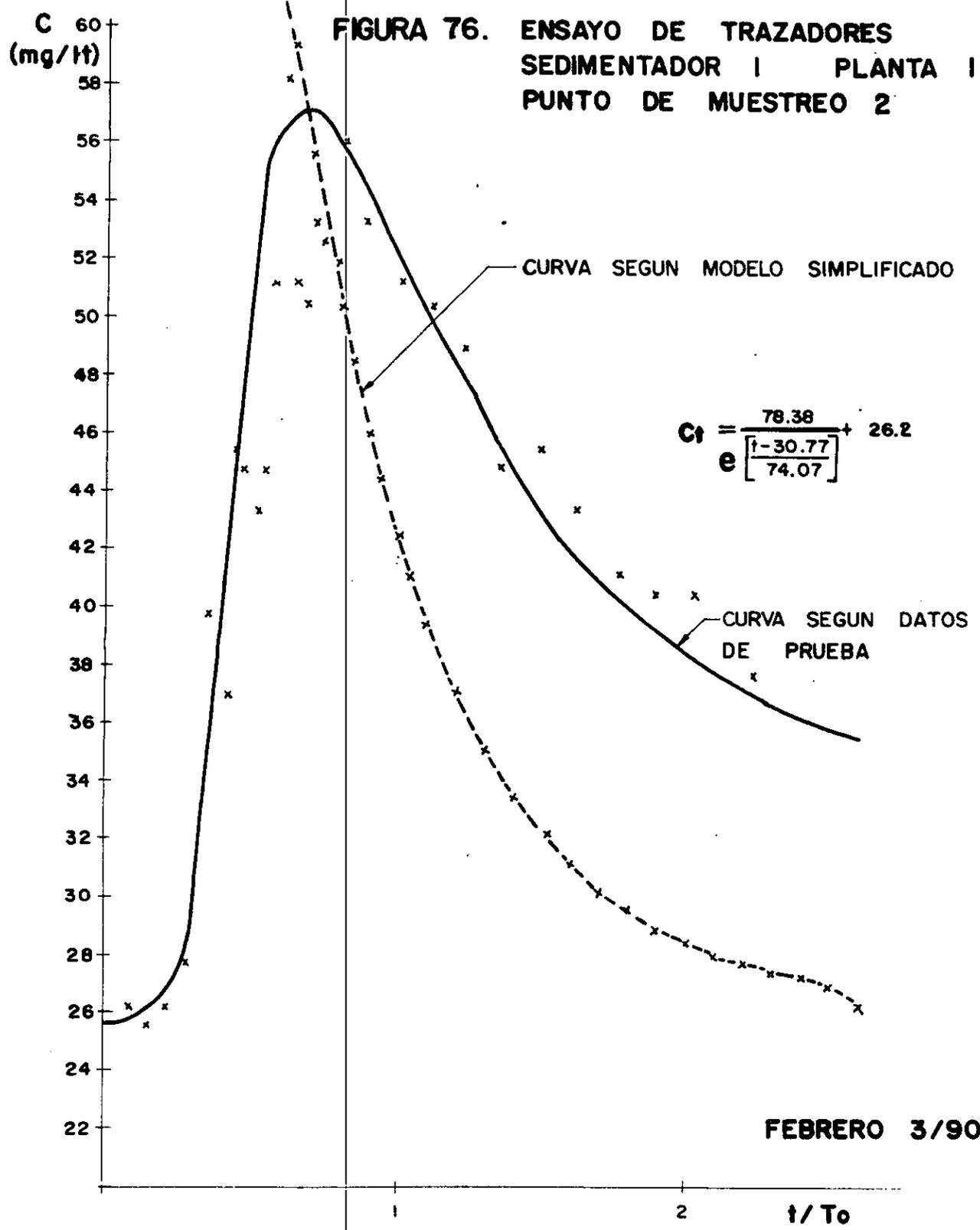


FIGURA 76. ENSAYO DE TRAZADORES  
SEDIMENTADOR I PLANTA I  
PUNTO DE MUESTREO 2



**TABLA 83.** Resultados ensayo de trazadores en el sedimentador uno de la planta uno. (S<sub>1-1</sub>). Feb 3/90.  
 T<sub>o1</sub> = 74 min. T<sub>o2</sub> = 148 min.

Número de orden	t min	t/T <sub>o</sub>	PUNTO 1				PUNTO 2				
			C-C <sub>o</sub> mg/lit	Σ(C-C <sub>o</sub> )	F(t)	1-F(t)	t/T <sub>o</sub>	C-C <sub>o</sub> mg/lit	Σ(C-C <sub>o</sub> )	F(t)	1-F(t)
1	0	0,00	0,0	0,0	0,00	1,00	0,00	0,0	0,0	0,00	1,00
2	10	0,14	1,9	1,9	0,00	1,00	0,07	0,2	0,2	0,00	1,00
3	20	0,27	3,3	5,2	0,01	0,99	0,14	0,5	0,7	0,00	1,00
4	30	0,41	5,7	10,9	0,02	0,98	0,20	1,2	1,9	0,00	1,00
5	40	0,54	7,9	18,8	0,03	0,97	0,27	2,8	4,7	0,01	0,99
6	50	0,68	17,3	36,1	0,06	0,94	0,34	9,5	14,2	0,02	0,98
7	60	0,81	23,7	59,8	0,11	0,89	0,41	17,3	31,5	0,05	0,95
8	70	0,95	30,3	90,1	0,16	0,84	0,47	21,9	53,4	0,09	0,91
9	80	1,08	30,3	120,4	0,22	0,78	0,54	28,8	82,2	0,14	0,86
10	90	1,22	28,3	148,7	0,27	0,73	0,61	31,0	113,2	0,19	0,81
11	100	1,35	26,7	175,4	0,32	0,68	0,68	31,4	144,6	0,25	0,75
12	110	1,49	25,6	201,0	0,36	0,64	0,74	31,2	175,8	0,30	0,70
13	120	1,62	24,4	225,4	0,41	0,59	0,81	30,1	205,9	0,35	0,65
14	130	1,76	23,2	248,6	0,45	0,55	0,88	28,9	234,8	0,40	0,60
15	140	1,89	22,5	271,1	0,49	0,51	0,95	27,5	262,3	0,45	0,55
16	150	2,03	21,5	292,6	0,53	0,47	1,01	26,3	288,6	0,49	0,51
17	160	2,16	20,5	313,1	0,56	0,44	1,08	24,7	313,3	0,53	0,47
18	170	2,30	19,8	332,9	0,60	0,40	1,15	23,5	336,8	0,57	0,43
19	180	2,43	19,0	351,9	0,63	0,37	1,22	22,5	359,3	0,61	0,39
20	190	2,57	18,3	370,2	0,67	0,33	1,29	21,2	380,5	0,65	0,35
21	200	2,70	17,5	387,7	0,70	0,30	1,35	20,1	400,6	0,68	0,32
22	210	2,84	17,0	404,7	0,73	0,27	1,42	18,5	419,1	0,71	0,29
23	220	2,97	16,1	420,8	0,76	0,24	1,49	17,6	436,7	0,74	0,26
24	230	3,11	15,3	436,1	0,78	0,22	1,55	16,7	453,4	0,77	0,23
25	240	3,24	14,7	450,8	0,81	0,19	1,62	16,2	469,6	0,80	0,20
26	250	3,38	14,0	464,8	0,84	0,16	1,69	15,4	485,0	0,82	0,18
27	260	3,51	13,5	478,3	0,86	0,14	1,76	14,9	499,9	0,85	0,15
28	270	3,65	12,7	491,0	0,88	0,12	1,82	14,2	514,1	0,87	0,13
29	280	3,78	12,3	503,3	0,91	0,09	1,89	13,8	527,9	0,90	0,10
30	290	3,92	11,9	515,2	0,93	0,07	1,96	13,1	541,0	0,92	0,08
31	300	4,05	11,0	526,2	0,95	0,05	2,03	12,7	553,7	0,94	0,06
32	310	4,19	10,3	536,5	0,97	0,03	2,09	12,1	565,8	0,96	0,04
33	320	4,32	9,8	546,3	0,98	0,02	2,16	11,8	577,6	0,98	0,02
34	330	4,46	9,3	555,6	1,00	0,00	2,23	11,1	588,7	1,00	0,00

Análisis de la curva de concentración de trazador para el punto 1:

$$\phi = 0,25 \quad \tan \alpha = 0,4254 \quad T_o = 74 \text{ min} \quad t_p = 75 \text{ min} \quad t_{10} = 60 \text{ min} \quad t_{90} = 101 \text{ min} \quad t_{99} = 230 \text{ min}$$

Tiempo en el que aparece el trazador en el efluente :  $t_1 = 20 \text{ min}$

Tiempo en que C es mayor que  $C_{max} / 2$  :  $t_c = 173 \text{ min}$  Tiempo en que C es mayor que  $C_{max} / 10$  :  $t_b = 440 \text{ min}$

Índice de dispersión de Morrill:  $I_M = t_{99} / t_{10} = 230 / 60 = 3,83$  Predominio de flujo mezclado

$t_1 / T_o = 20 / 74 = 0,27 < 0,30$  Flujo a pistón y existe tendencia a cortocircuito

$t_m / T_o = 101 / 74 = 1,36 < 1,00$  Presencia de zonas muertas

$t_p / T_o = 75 / 74 = 1,01$  Predomina el flujo a pistón.

$t_b / T_o = 440 / 74 = 5,95$

$t_c / T_o = 173 / 74 = 2,30$

Excentricidad de la curva:

$$e = \frac{(t_c - t_p) - (t_p - t_1)}{T_o} = \frac{(450 - 75) - (75 - 20)}{74} = 4,32 \quad \text{Flujo mezclado}$$

Funciones de flujo :

$$p = \frac{\phi \tan \alpha}{0,434 + \phi \tan \alpha} = \frac{0,25 \times 0,4254}{0,434 + 0,25 \times 0,4254} = 0,20$$

$$\text{Zonas muertas: } m = 1 - \frac{\phi}{p} = 1 - \frac{0,25}{0,20} = -0,25$$

Fracción de flujo a pistón:  $p (1 - m) = 0,20 \times (1 + 0,25) = 0,25$

Fracción de flujo mezclado:  $(1 - p) (1 - m) = (1 - 0,20) (1 + 0,25) = 1,00$

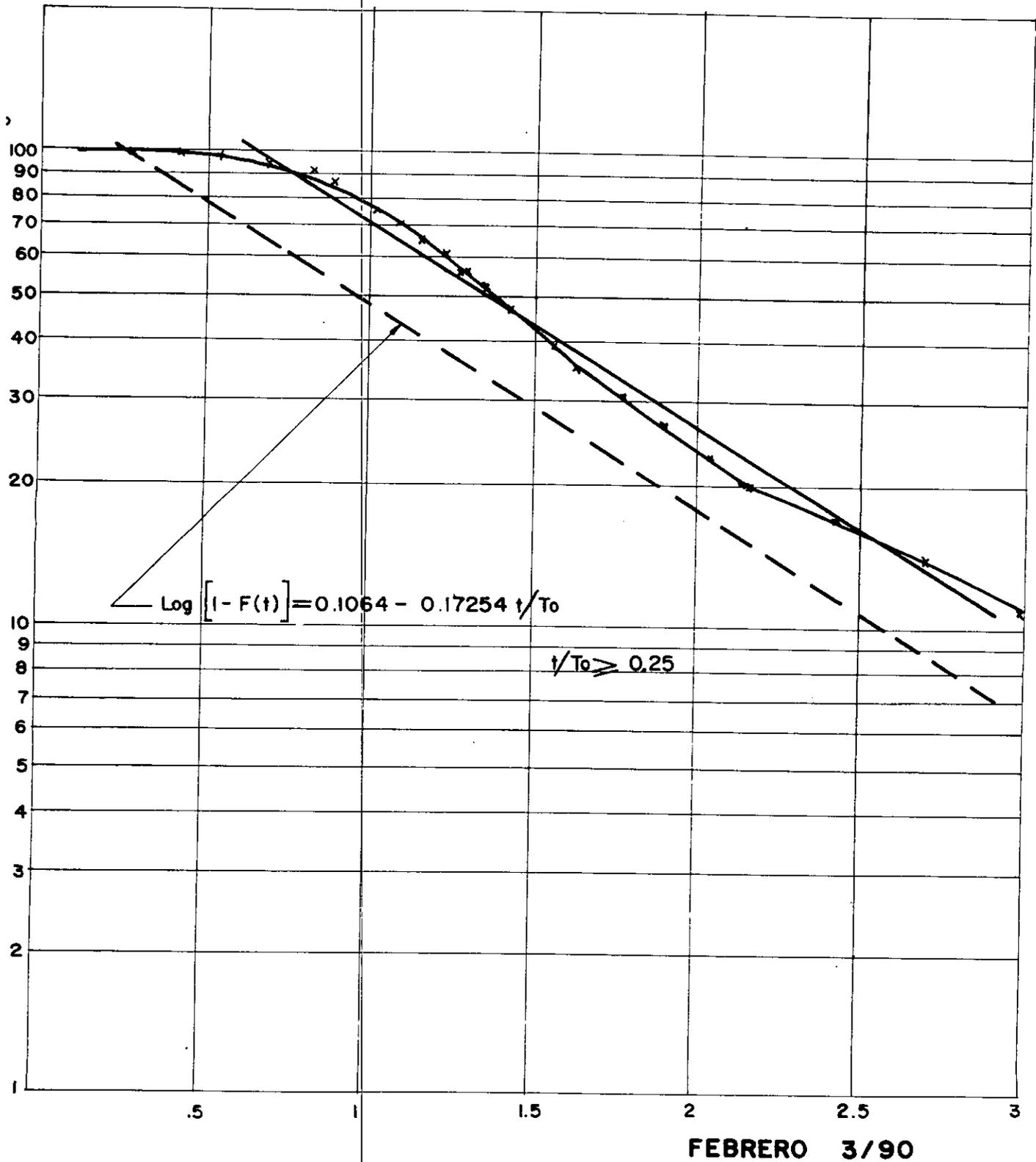
Concentración inicial de cloruros:

$$C_o = \frac{Q \cdot \delta t \cdot \Sigma C1}{(1 - p) (1 - m) V} = \frac{0,208 \times 10 \times 60 \times 555,60}{(1 - 0,20) (1 + 0,25) 925} = 75,0$$

Ecuación de la curva de la función  $1 - F(t)$  según el modelo simplificado de Wolf y Resnick :

$$C_t = C_o \left[ \frac{1}{(1 - 0,20) (1 + 0,25)} \left( \frac{t}{74} - 0,20 (1 + 0,25) \right) - (t - 18,5) / 74 \right] + 26,2 = C_o \left[ \frac{t}{74} - 0,20 (1 + 0,25) \right] + 26,2, \quad t \text{ en min}$$

FIGURA 77. ENSAYO DE TRAZADORES  
 SEDIMENTADOR I PLANTA I  
 PUNTO DE MUESTREO I



Análisis de la curva de concentración de trazador para el punto 2:

$$\phi = 0,27 \quad \tan \alpha = 0,8532 \quad T_0 = 148 \text{ min} \quad t_p = 105 \text{ min} \quad t_{10} = 68 \text{ min} \quad t_{50} = 109 \text{ min} \quad t_{90} = 240 \text{ min}$$

Tiempo en el que aparece el trazador en el efluente :  $t_1 = 35 \text{ min}$

Tiempo en que C es mayor que  $C_{max} / 2$  :  $t_c = 175 \text{ min}$  Tiempo en que C es mayor que  $C_{max} / 10$  :  $t_b = 320 \text{ s}$

Indice de dispersión de Morrill:  $I_M = t_{90} / t_{10} = 240 / 68 = 3,53$

$t_1 / T_0 = 35 / 148 = 0,24 < 0,30$  Predomina flujo mezclado y existe tendencia a cortocircuito

$$t_m / T_0 = 109 / 148 = 0,74$$

$t_p / T_0 = 105 / 148 = 0,71$  Predomina el flujo a pistón.

$$t_b / T_0 = 320 / 148 = 2,16$$

$$t_c / T_0 = 175 / 148 = 1,18$$

Excentricidad de la curva:

$$e = \frac{(t_r - t_p) - (t_p - t_1)}{T_0} = \frac{(720 - 105) - (105 - 35)}{148} = 3,68 \text{ Flujo mezclado}$$

Funciones de flujo :

$$p = \frac{\phi \tan \alpha}{0,434 + \phi \tan \alpha} = \frac{0,27 \times 0,8532}{0,434 + 0,27 \times 0,8532} = 0,35$$

$$\text{Zonas muertas: } m = 1 - \frac{\phi}{p} = 1 - \frac{0,27}{0,35} = 0,23$$

$$\text{Fracción de flujo a pistón: } p(1 - m) = 0,35 \times (1 - 0,23) = 0,27$$

$$\text{Fracción de flujo mezclado: } (1 - p)(1 - m) = (1 - 0,35)(1 - 0,23) = 0,50$$

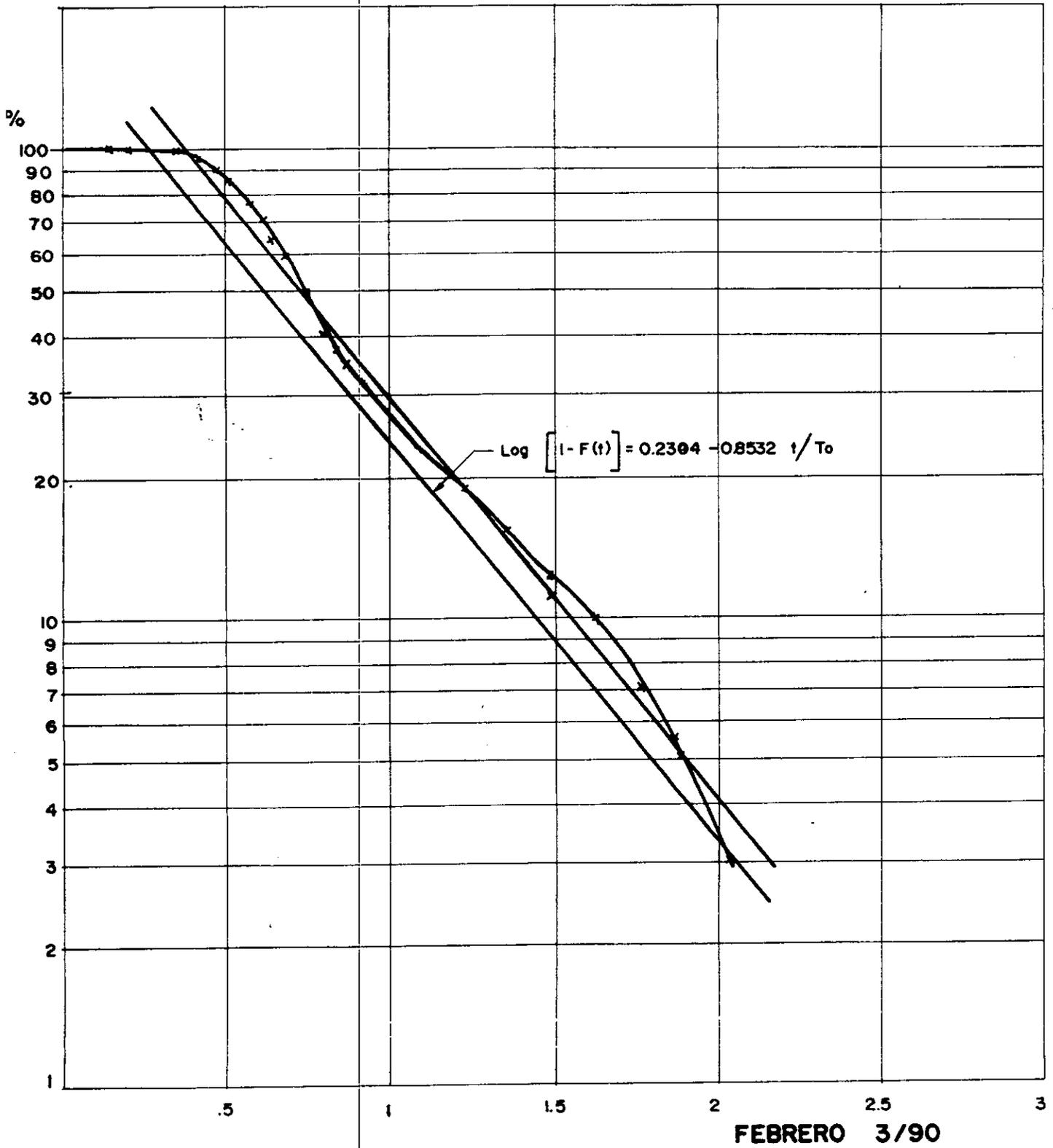
Concentración inicial de cloruros:

$$C_0 = \frac{Q \cdot \delta t \cdot \Sigma Cl}{(1 - p)(1 - m)V} = \frac{0,208 \times 10 \times 60 \times 588,7}{(1 - 0,35)(1 - 0,23) 1.850} = 79,3$$

Ecuación de la curva de la función  $1 - F(t)$  según el modelo simplificado de Wolf y Resnick :

$$C_t = C_0 \left[ \frac{1}{(1 - 0,35)(1 - 0,23)} \left( \frac{t}{148} \right)^{0,35(1 - 0,23)} - \left( \frac{t}{148} - 39,91/74,1 \right) + 26,2 \right] + 26,2$$

FIGURA 78. ENSAYO DE TRAZADORES  
 SEDIMENTADOR 1 PLANTA 1  
 PUNTO DE MUESTREO 2



5.3.2.1 Porcentajes de flujo de pistón y mezclado. Del ensayo de trazadores sobre el sedimentador S<sub>1-1</sub> se pudo establecer que en los mismos predomina el flujo mezclado. Este corresponde al 50 por ciento, mientras que el flujo a pistón representa un 27 %. Este hecho resulta desventajoso para el proceso de sedimentación, pues lo ideal es que predomine el flujo a pistón. El flujo a pistón puede garantizar el que se presenten velocidades iguales para una misma sección transversal evitandose la formación de corrientes que impidan la caída de las partículas a sedimentar.

En las restantes unidades es notorio el predominio del flujo mezclado, incluso turbulento, en el primer tercio de la longitud del sedimentador. Esta turbulencia varía con la temperatura siendo máxima a las horas del medio día. Esto fue corroborado al analizar los datos del ensayo de trazadores para el punto 1, localizado en la mitad de la longitud del sedimentador. Hasta esta sección el flujo mezclado representaba el 80%, mientras que el flujo a pistón era solo el 20%.

5.3.2.2 Espacios muertos y cortocircuitos. Para el sedimentador analizado se encontró que presentaba zonas de no flujo o zonas muertas. Estas masas de agua estáticas representaban el 23 % del volumen de la unidad.

Además en la primera mitad del sedimentador se presentaron zonas muertas negativas, indicándonos que se da el desplazamiento de masas de agua en el sentido inverso al flujo. Estos movimientos tendrían su origen en corrientes térmicas, siendo también causados por los vientos. La influencia del viento es más notoria en las horas de la tarde.

En cuanto a la presencia de cortocircuitos, estos no se detectaron durante la prueba, lo que se corrobora al comparar los tiempos de detención teórico y real. Este último resultó ser menor que el teórico, indicándonos la presencia de zonas muertas. No obstante al comparar los caudales tomados por cada sedimentador y tener en cuenta el volumen de lodos en los mismos, se concluye que se presentan cortocircuitos cuando el volumen de los lodos se deja exceder de la mitad del volumen total, con la consecuente desmejoría de la calidad del agua sedimentada.

**5.3.2.3 Carga superficial real.** Para determinar la carga superficial real con que estaba operando el sedimentador, se calcula la misma a partir del tiempo real de detención encontrado en el ensayo de trazadores.

$$q \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{/día)} = \frac{\text{Altura útil de la unidad}}{\text{Tiempo real de detención}} \times 1440 \text{ min/día} =$$

$$q \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{/día)} = \frac{4,40 \text{ m}}{105 \text{ min}} \times 1440 \text{ min/día} = 60,3 \text{ m}^3\text{/m}^2\text{/día}$$

Esta carga superficial resulta superior a la determinada teóricamente en el numeral 5.3.1.3., de 50 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día para esta misma unidad. En el mismo numeral se dice también que esta unidad podría trabajar con una carga de 74 m<sup>3</sup>/día, sin desmejorar la calidad del agua sedimentada.

Las restantes unidades estaban operando con cargas inferiores, por estar recibiendo menos caudal.

**5.3.2.4 Tiempo real de detención del sedimentador.** Del ensayo de trazadores se obtuvo que el tiempo real de detención del sedimentador fué de 105 minutos, mucho menor que el teórico estimado en 148 minutos.

Sin embargo este tiempo es variable de una unidad a otra, dependiendo de la cantidad de lodos depositados, y el estado de colmatación de los filtros. Así si los filtros de la planta uno estan en el final de sus respectivas carreras de filtración, el mayor caudal lo tomará la planta dos variandose los tiempos de detención.

**5.3.2.5 Determinación de líneas de flujo y topogramas de turbiedad.** El objetivo de esta prueba es encontrar las líneas de flujo del sedimentador haciendo un levantamiento de las curvas de isoturbiedad tanto en planos horizontales como verticales.

Para esto se dividió en secciones adecuadas el sedimentador (Figura 58) y se tomaron muestras para medir la turbiedad.

**TABLA 84.** Valores de turbiedad en U.N.T. para el dibujo de las curvas de isoturbiedad. S3-2.

DISTANCIA ■	PROFUNDIDAD ■	NUMERO DE IDENTIFICACION DE LA MUESTRA				
		1-4	5-8	9-12	13-16	17-20
1,0	4,00	14,0	8,3	5,0	6,7	7,2
	2,75	5,2	6,4	7,6	3,0	4,2
	1,50	2,7	3,1	2,1	3,0	2,1
	0,00	3,4	3,1	2,3	2,7	3,2
DISTANCIA ■	PROFUNDIDAD ■	NUMERO DE IDENTIFICACION DE LA MUESTRA				
		21-24	25-28	29-32	33-36	37-40
8,5	4,00	8,1	5,6	3,2	4,2	3,6
	2,75	3,9	6,0	3,0	4,0	3,7
	1,50	3,3	2,3	2,5	2,9	2,4
	0,00	3,1	2,2	2,2	2,2	3,1
DISTANCIA ■	PROFUNDIDAD ■	NUMERO DE IDENTIFICACION DE LA MUESTRA				
		41-44	45-48	49-52	53-56	57-60
16,0	4,00	2,9	2,7	2,6	2,8	2,9
	2,75	2,1	2,4	2,9	2,8	2,7
	1,50	2,4	2,4	2,3	2,4	2,5
	0,00	2,3	2,3	2,1	2,3	2,3
DISTANCIA ■	PROFUNDIDAD ■	NUMERO DE IDENTIFICACION DE LA MUESTRA				
		61-64	65-68	69-72	73-76	77-80
23,5 ■	4,00	2,8	7,4	2,7	2,5	2,6
	2,75	3,4	3,2	2,8	3,6	2,1
	1,50	2,5	2,8	2,9	2,5	2,3
	0,00	2,3	2,8	2,6	2,2	2,5
DISTANCIA ■	PROFUNDIDAD ■	NUMERO DE IDENTIFICACION DE LA MUESTRA				
		81-84	85-88	89-92	93-96	97-100
32,0 ■	4,00	2,4	2,5	2,6	2,6	2,5
	2,75	2,8	2,3	3,1	2,4	2,3
	1,50	2,0	2,4	2,1	2,2	2,2
	0,00	2,1	2,4	2,4	2,1	2,0

**TABLA 85.** Valores de turbiedad en U.N.T. para el dibujo de las curvas de isoturbiedad. S<sub>1-2</sub>.

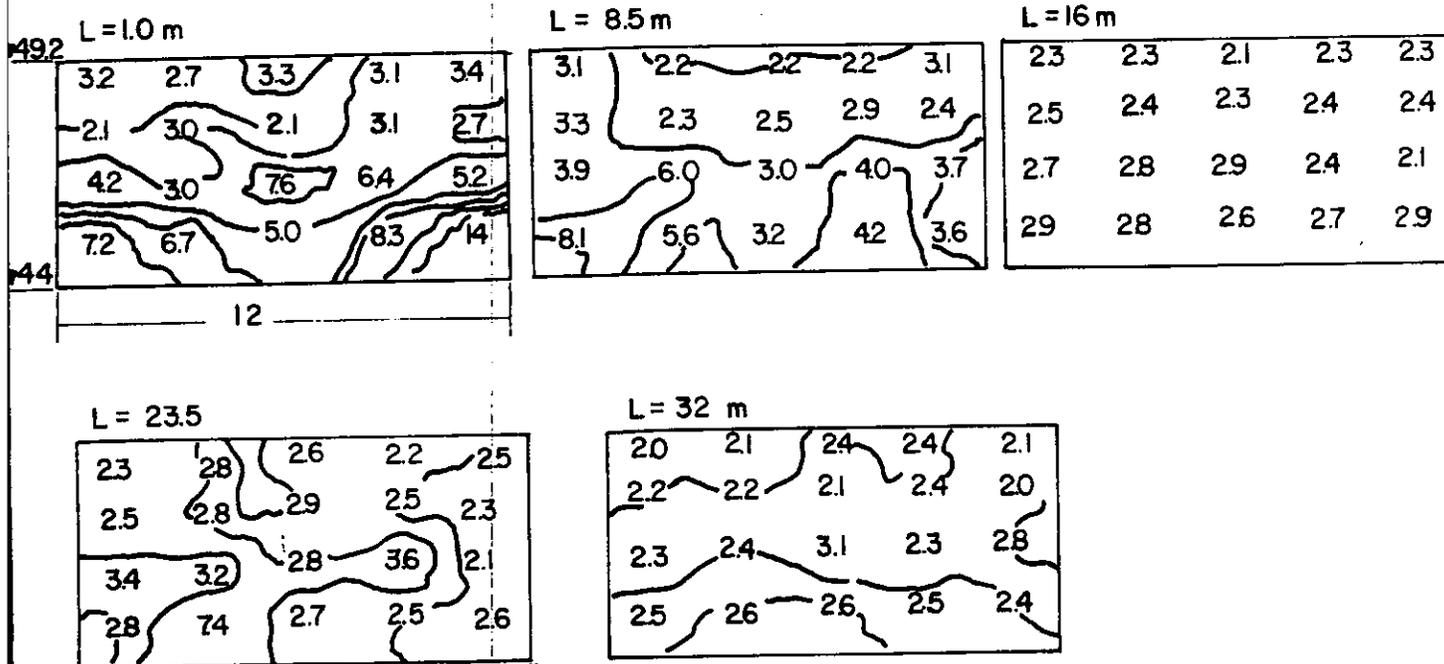
DISTANCIA m	PROFUNDIDAD m	NUMERO DE LA MUESTRA			DISTANCIA m	PROFUNDIDAD m	NUMERO DE LA MUESTRA		
		1-3	4-6	7-9			10-12	13-15	16-18
2,6	4,25	18,0	17,0	19,0	5,2	4,25	14,0	16,0	18,0
	3,00	19,0	17,0	17,0		3,00	15,0	16,0	18,0
	1,75	18,0	14,0	16,0		1,75	17,0	16,0	18,0
DISTANCIA m	PROFUNDIDAD m	NUMERO DE LA MUESTRA			DISTANCIA m	PROFUNDIDAD m	NUMERO DE LA MUESTRA		
		19-21	22-24	25-27			28-30	31-33	34-36
7,8	4,25	†	†	†	10,4	4,25	†	†	†
	3,00	19,0	18,0	21,0		3,00	18,0	26,0	17,0
	1,75	15,0	15,0	16,5		1,75	12,5	15,0	13,0
DISTANCIA m	PROFUNDIDAD m	NUMERO DE LA MUESTRA			DISTANCIA m	PROFUNDIDAD m	NUMERO DE LA MUESTRA		
		37-39	40-42	43-45			46-48	49-51	52-54
13,0	4,25	†	†	†	15,6	4,25	†	†	†
	3,00	25,0	29,0	17,0		3,00	39,0	26,0	20,0
	1,75	15,0	15,0	20,0		1,75	13,0	5,4	8,0
DISTANCIA m	PROFUNDIDAD m	NUMERO DE LA MUESTRA			DISTANCIA m	PROFUNDIDAD m	NUMERO DE LA MUESTRA		
		55-57	58-60	61-63			64-66	67-69	70-72
18,2	4,25	†	†	†	20,8	4,25	†	†	†
	3,00	9,5	7,6	6,4		3,00	5,5	5,0	4,8
	1,75	4,9	5,6	6,0		1,75	4,6	4,4	4,5
DISTANCIA m	PROFUNDIDAD m	NUMERO DE LA MUESTRA			DISTANCIA m	PROFUNDIDAD m	NUMERO DE LA MUESTRA		
		73-75	76-78	79-81			82-84	85-87	88-90
23,4	4,25		18,0	23,0	26	4,25	7,6	6,6	7,0
	3,00	4,9	4,3	4,6		3,00	6,8	5,8	6,5
	1,75	4,0	4,0	4,0		1,75	4,4	5,2	4,3
DISTANCIA m	PROFUNDIDAD m	NUMERO DE LA MUESTRA			DISTANCIA m	PROFUNDIDAD m	NUMERO DE LA MUESTRA		
		91-93	94-96	97-99			100-102	103-105	106-108
28,6	4,25	6,2	5,5	6,6	31,2	4,25	5,6	6,1	4,6
	3,00	5,3	4,7	5,8		3,00	4,1	4,8	4,4
	1,75	4,0	4,2	4,3		1,75	4,0	4,2	4,0

† Valores de turbiedad mayores a 100 U.N.T.

En las Figuras 79 a 82 se muestran las curvas de isoturbiedad para los sedimentadores estudiados.

FIGURA 79. CURVAS DE ISOTURBIEDAD

Sedimentador S Planta dos. en secciones transversales



Planta longitudinal a nivel 44.6

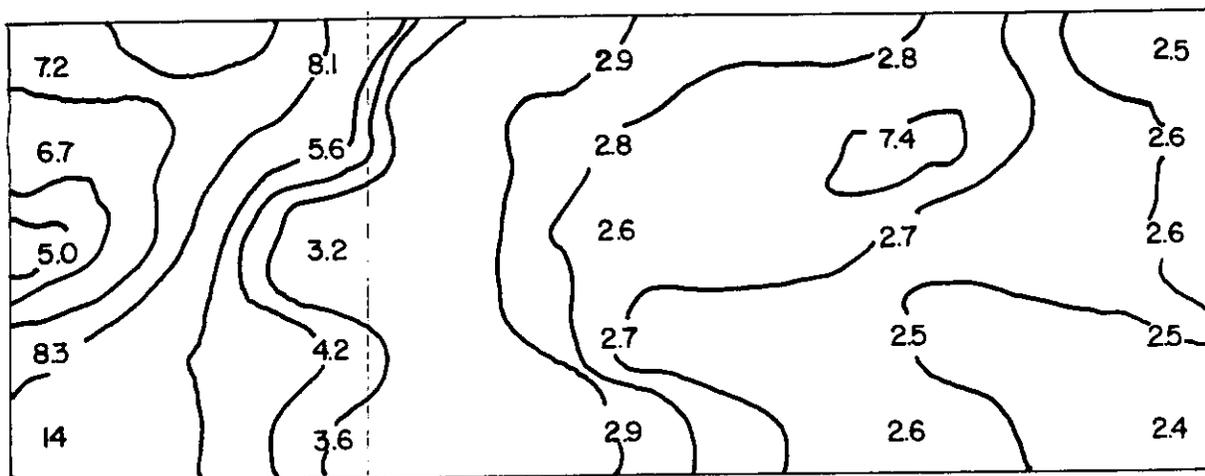
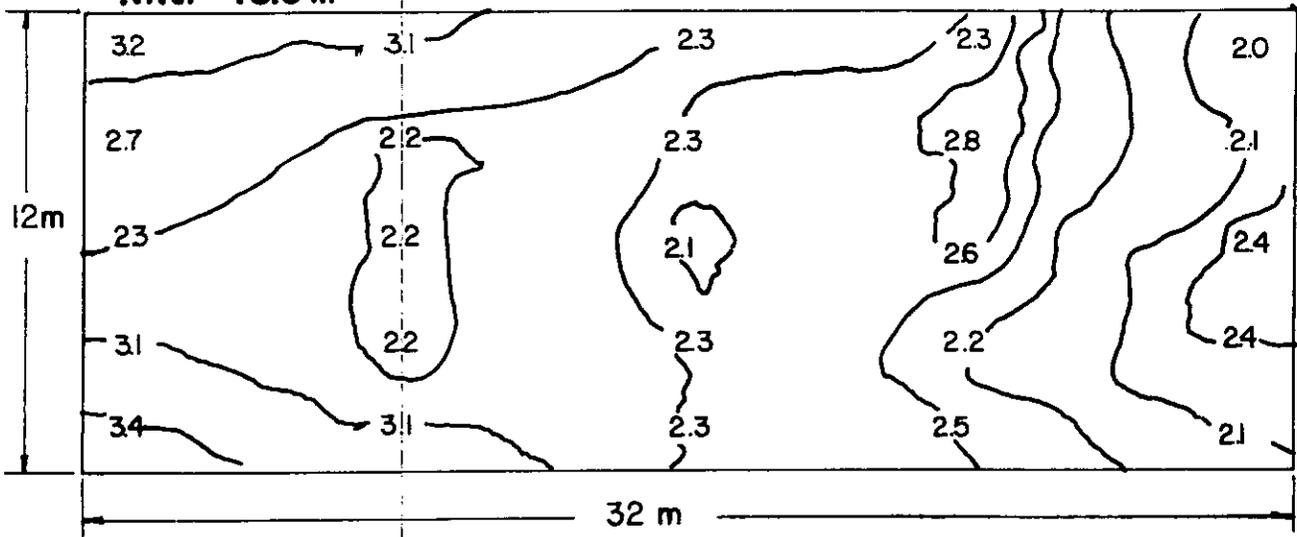
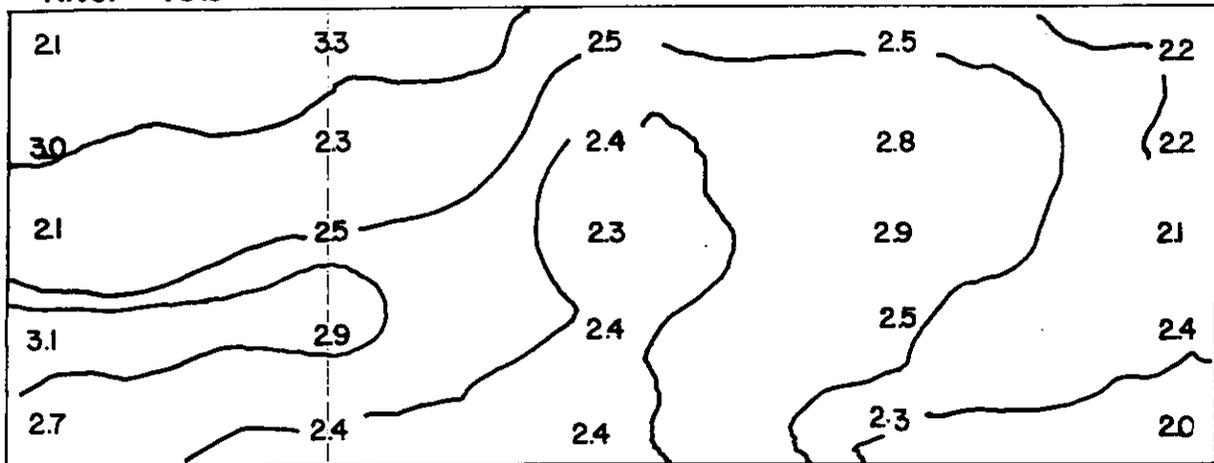


FIGURA 80. CURVAS DE ISOTURBIEDAD EN SECCIONES LONGITUDINALES  
SEDIMENTADOR 3-2 PLANTA 2

Nivel 48.6 m



Nivel 46.9 m



Nivel 45.6 m

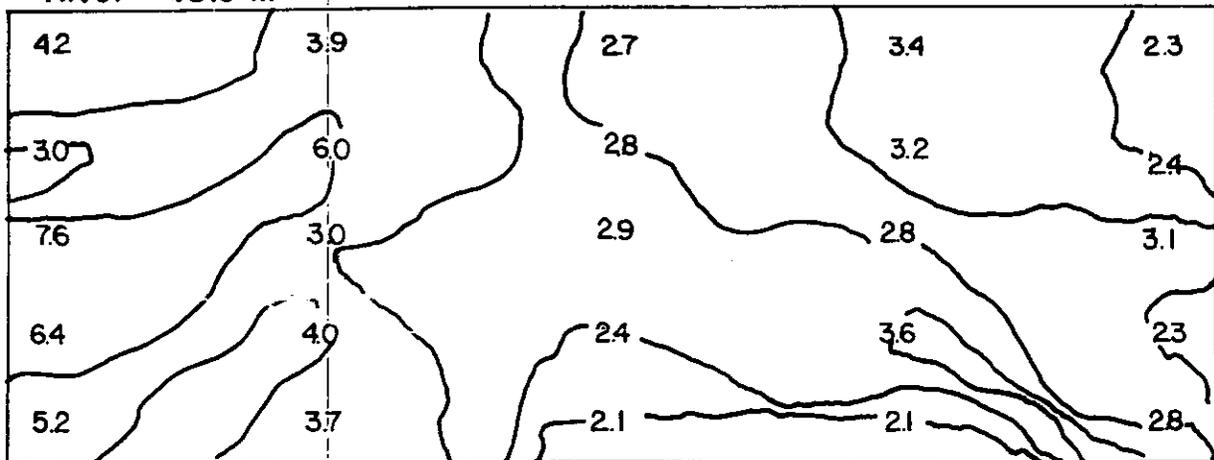


FIGURA 81. CURVAS DE ISOTURBIEDAD EN SECCIONES TRANSVERSALES SEDIMENTADOR 1-2 PLANTA 2

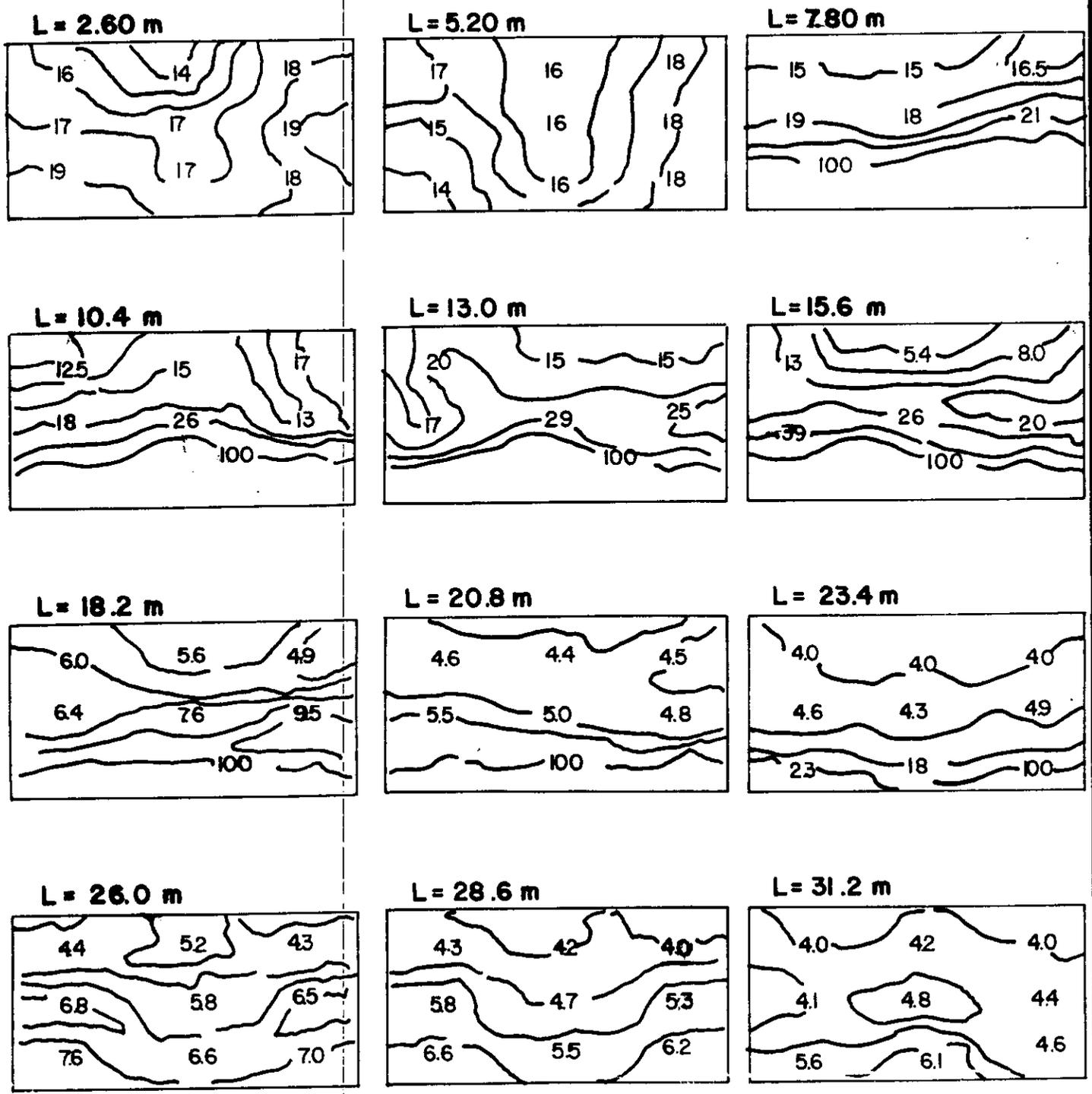
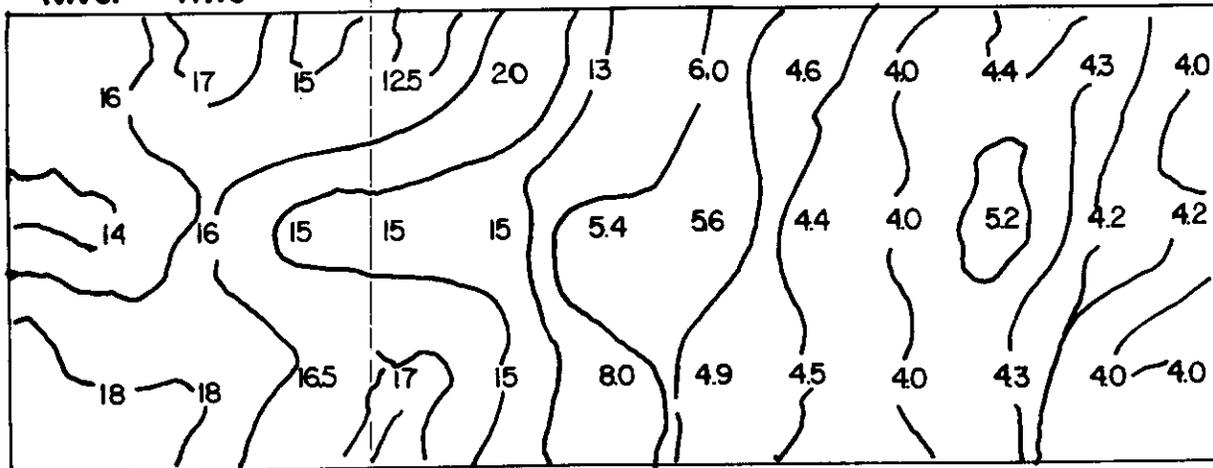
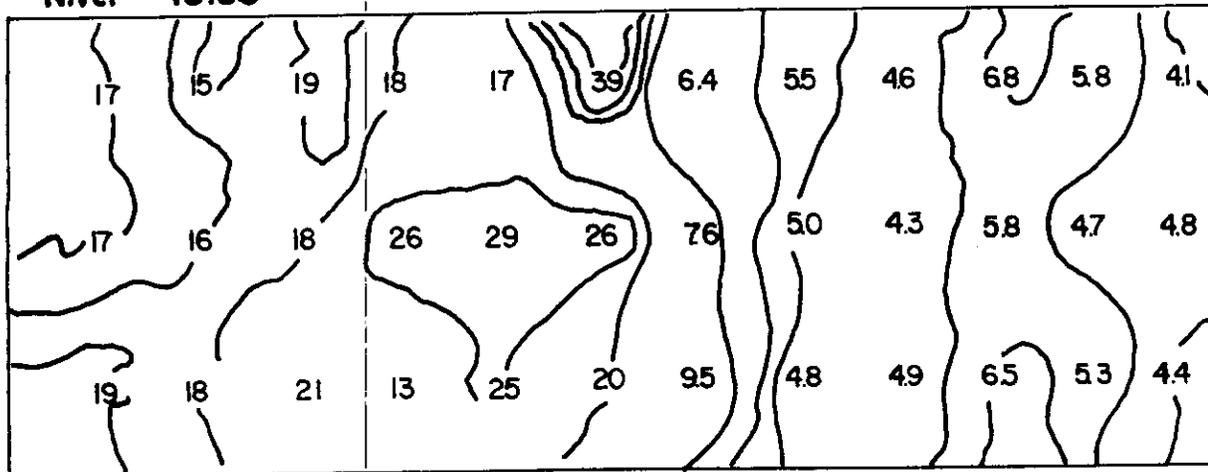


FIGURA 82. CURVAS DE ISOTURBIEDAD EN SECCIONES LONGITUDINALES SEDIMENTADOR 1-2 PLANTA 2

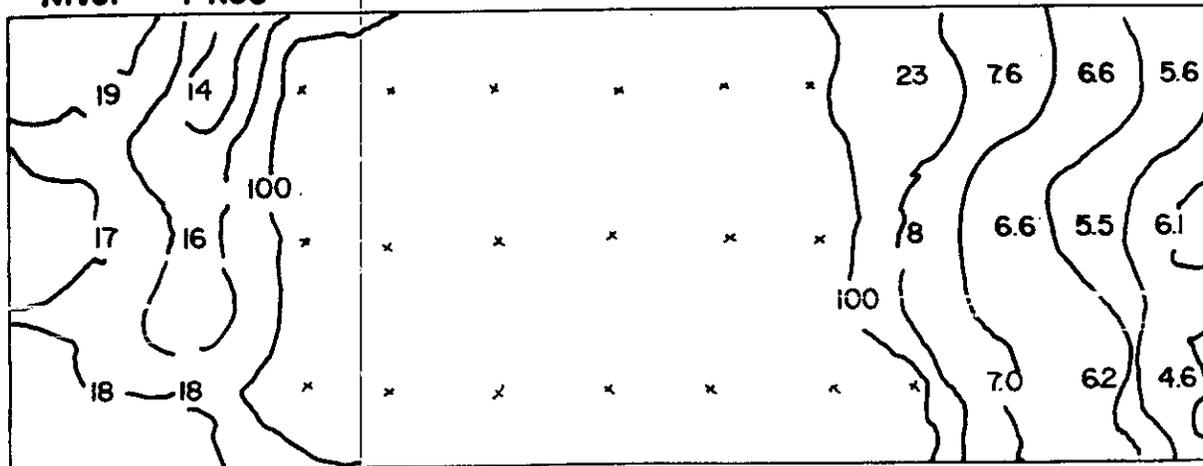
Nivel 47.10



Nivel 45.85



Nivel 44.60



Al observar las líneas de flujo de las Figuras 79 y 80, las cuales corresponden a una unidad recientemente lavada, concluimos que:

- La pantalla difusora con que cuenta esta unidad provoca un flujo uniforme.
  
- Ya en el segundo tercio de la longitud del sedimentador, se presentan, en la parte superior, las turbiedades que normalmente producen estas unidades. Por lo anterior, se encuentra acertada la disposición de la salida mediante canaletas superficiales colectoras. Actualmente estos canales se encuentran en los últimos cinco metros de la longitud del sedimentador, haciéndose viable extenderlas de 5 a 8 metros más.

De similar análisis para las figuras 81 y 82, correspondientes al sedimentador S<sub>1-2</sub>, el cual presentaba ya bastantes lodos, concluimos:

- La descarga en la entrada, mediante orificio horizontal, provoca la turbulencia del agua al obligar su ascenso en el primer tramo del sedimentador, desaprovechándose esta zona para el proceso de sedimentación.
  
- Hasta la mitad de la unidad se nota la presencia de una componente horizontal que provoca cauces con agua de diferentes turbiedades.

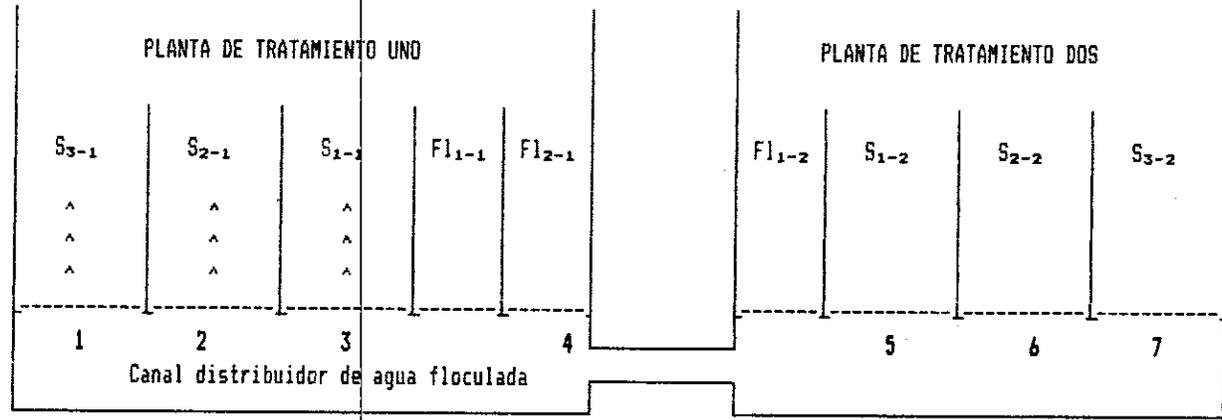
- Después de la longitud media del sedimentador, las líneas de flujo se vuelven uniformes, aunque no se logra la misma remoción que en la unidad anteriormente evaluada. Esto podría estar originándose en que el hecho de que la salida por sólo tres orificios causan una leve resuspensión de las partículas ya estabilizadas sobre los lodos.

**5.3.3 Características de la zona de entrada.** Los parámetros de control aplicables a las obras de conexión entre flocladores y sedimentadores son la velocidad de flujo y la intensidad de mezcla expresada como gradiente de velocidad.

De la velocidad se quiere que sea la suficiente para evitar el depósito de sedimentos en esta zona y de la intensidad de mezcla, que los gradientes sean tan bajos que no provoquen la ruptura del flóculo.

En las plantas uno y dos del acueducto de Cartagena estas obras las constituyen dos canales rectangulares de dimensiones 1,0 m de ancho, 2,7 m de profundidad y 36,9 m de longitud, cada uno, intercomunicados por un tubo con diámetro de 0,61 m, y las válvulas de descarga por el fondo del canal, en diámetro de 0,41 m, que en número de tres alimentan a cada sedimentador.

La repartición de caudales se toman de los resultados de los ensayos con trazadores, ya determinados en la Tabla 83. Se chequean los valores de velocidad y gradiente tanto en el canal de distribución como en los orificios de entrada a cada unidad. (Tabla 86). Las velocidades se determinaron aproximadamente, aplicando la ecuación de continuidad en diversas secciones del canal, mostradas en la siguiente figura.



Para calcular la gradiente de velocidad en los canales de distribución y en los orificios rectangulares, aplicamos la fórmula:

$$G = n \sqrt{\frac{\tau}{\mu}} R_h^{-0.7} V^{1.5}$$

donde

G = Gradiente de velocidad (s<sup>-1</sup>).

n = Coeficiente de rugosidad para concreto = 0,013.

$\tau$  = Densidad del agua.

$\mu$  = Viscosidad absoluta  $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2\text{s}$ .

$R_h$  = Radio hidráulico =  $A/P$  (m).

$V$  = Velocidad (m/s).

Y para los orificios circulares, la ecuación:

$$G = \frac{(0,04) \cdot V^3}{\nu \cdot 8 \cdot R_h}$$

donde

$G$  = Gradiente de velocidad ( $\text{s}^{-1}$ ).

$V$  = Velocidad del agua (cm/s).

$\nu$  = Viscosidad cinemática (stokes).

$R_h$  = Radio hidráulico =  $A/P$  (m).

**TABLA 86.** Características de la zona de entrada a los sedimentadores. Plantas uno y dos.

Sección conside- rada	Condiciones en el canal distribuidor					Condiciones a la entrada al sedimentador			
	Caudal acumulado ( $\text{m}^3/\text{día}$ ) ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Área ( $\text{m}^2$ )	Velocidad ( $\text{cm}/\text{s}$ )	Gradiente ( $\text{s}^{-1}$ )	Caudal de cada unidad ( $\text{m}^3/\text{día}$ )	Área de entrada ( $\text{m}^2$ )	Velocidad ( $\text{cm}/\text{s}$ )	Gradiente ( $\text{s}^{-1}$ )	
1	6.410	0,074	1,80	4,1	0,73	6.410	3 x 0,132	18,7	20,0
2	24.769	0,212	1,80	15,9	5,57	18.359	0,396	53,6	96,8
3	44.150	0,224	1,80	28,4	13,24	19.381	0,396	56,6	105,0
4	2.260	0,026	0,64	4,1	1,17				
5	15.792	0,031	1,80	10,2	2,83	2.692	0,396	7,9	5,4
6	13.100	0,104	1,80	8,4	2,14	8.997	0,396	26,3	33,2
7	4.103	0,047	1,80	2,6	0,38	4.103	0,396	12,0	10,2

Como se observa en la tabla anterior, en varios tramos del canal distribuidor se están dando velocidades demasiado bajas, provocando la sedimentación dentro del mismo. Y confirmando lo anterior, por inspección hecha, encontramos en diversas secciones del canal una capa de sedimento de aproximadamente 8 cm en el fondo.

En los orificios de entrada a cada unidad, se está presentando el estrangulamiento del floc, al producirse gradientes de agitación mayores a los que se tuvieron en la floculación. Esta situación se observa en los sedimentadores S<sub>1-1</sub> y S<sub>2-1</sub>, los cuales, al momento de la evaluación, eran los que tomaban caudales cercanos a los de diseño. Esto confirma la inconveniencia del sistema de entrada utilizado, siendo recomendable disponer de unas entradas de mayor diámetro y/o en número mayor.

Por ejemplo, tomando un caudal de diseño por sedimentador, de 20.000 m<sup>3</sup>/día, y disponiendo seis entradas con diámetro de 0,41 m, tendríamos:

$$\text{Area de entrada} : 0,132 \times 6 = 0,792 \text{ m}^2$$

$$\text{Velocidad} : 29,2 \text{ cm/s} \quad \text{y} \quad \text{Gradiente} : 38,9 \text{ s}^{-1}$$

O utilizando cinco entradas de 0,61 m de diámetro:

$$\text{Area de entrada} : 1,461 \text{ m}^2$$

$$\text{Velocidad} : 15,8 \text{ cm/s} \quad \text{y} \quad \text{Gradiente} : 12,7 \text{ s}^{-1}$$

También se notó la formación de un resalto en el punto (4) donde el canal presenta un estrangulamiento brusco a sección cuadrada para volver inmediatamente después a su sección original. Este estrangulamiento hecho en madera al parecer tiene por función servir de soporte a una compuerta que se instalaría para aislar la planta uno sin interrumpir el flujo en sus floculadores. Esta condición de operación no es funcional. A causa de las altas velocidades que allí se producen, se rompe el flóculo como pudo comprobarse, al tomar muestras del agua antes y después de la obstrucción.

Otra situación anómala encontrada es la forma de descarga del floculador Fl2-1 al canal de interconexión. Lo hace sobre un vertedero libre de cresta ancha sin ventilación lo que produce la intermitencia del flujo, el rompimiento del flóculo a la caída, y la turbulencia del agua ya en el canal.

Los sedimentadores de la planta uno no tienen pantallas difusoras que aseguren una buena repartición del flujo. Se observa en el primer cuarto del sedimentador una zona de alta turbiedad en estado de agitación. Esta turbulencia disminuye al avanzar el día debido a las corrientes de densidad que se dan durante las horas soleadas, y se vuelve a presentar en horas de la tarde.

La zona de entrada de los sedimentadores de la planta dos también presenta tres válvulas en el fondo del canal y si tiene pantalla difusora. Esta consiste en seis grupos de orificios de 20 cm x 20 cm. Cada grupo tiene 24 orificios (6 x 4). A nivel del fondo tiene seis aberturas de 30 cm x 1 m de ancho. Se logra así una mejor distribución del flujo y se reducen los gradientes de velocidad del agua hasta valores inferiores a  $2 \text{ s}^{-1}$ .

Del ensayo con trazadores, en general se encontró que la mayor parte del tiempo la planta uno recibe agua floculada de la planta dos, invirtiéndose el flujo sólo cuando los filtros de la planta dos están simultáneamente en sus primeras horas de filtración.

Se presentan entonces en la operación situaciones tan irregulares como la de que la planta uno esté filtrando aproximadamente el 70% del agua que reciben en común, situación que no debería darse por estar ambas plantas en condiciones de diseño muy similares.

**5.3.4 Características de la zona de salida.** La salida del agua sedimentada se hace en cada tanque por tres compuertas de diámetro de 0,61 m que descargan lateralmente en un canal transversal colocado sobre la parte final de los sedimentadores.

Este canal, de dimensiones 0,91 m, 1,33 m y 36,9 m, presenta el orificio de salida en la pared lateral a una distancia aproximadamente de 1 m de la superficie del agua, por lo que se crea una gran zona muerta en el volumen de agua que ocupa el espacio debajo del canal.

Puesto que las partículas en el extremo del sedimentador son muy pequeñas y su velocidad de sedimentación muy baja, cualquier perturbación puede originar que la componente ascensional de la velocidad,  $V_u$ , levante los flóculos. Si consideramos flujo ideal, las partículas con velocidad de sedimentación  $V_s$  menor que la crítica resultarán arrastradas en la proporción  $V_u/V_s$ .

Con sólo tres orificios de salida se presenta gran distorsión de las líneas de flujo y es de esperar que estén pasando partículas re-suspendidas en el flujo. La velocidad media de salida por una de estas compuertas, para un sedimentador con caudal de 0,224 m<sup>3</sup>/s será de:

$$V = \frac{4 \times 0,224 \text{ m}^3/\text{s}}{3 \times \pi (0,61)^2} \times 100 = 25,55 \text{ cm/s}$$

### 5.3.5 Características de la zona de depósito de lodos.

Por la forma en que se distribuyen los lodos a lo largo del sedimentador, se puede caracterizar la eficiencia del tratamiento. En general los sedimentos se depositan sobre la zona de lodos en forma no uniforme. En un agua bien floculada predominarán las partículas grandes por lo que es de esperar que un 75% a 90% de los lodos se depositen en el primer tercio del sedimentador. En cambio cuando el agua no ha tenido una buena floculación se produce un depósito uniforme de los mismos.

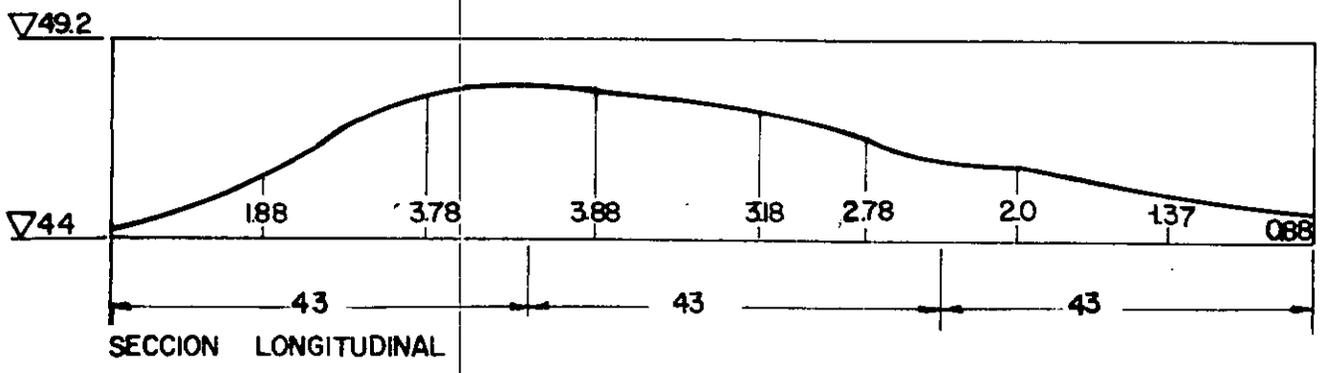
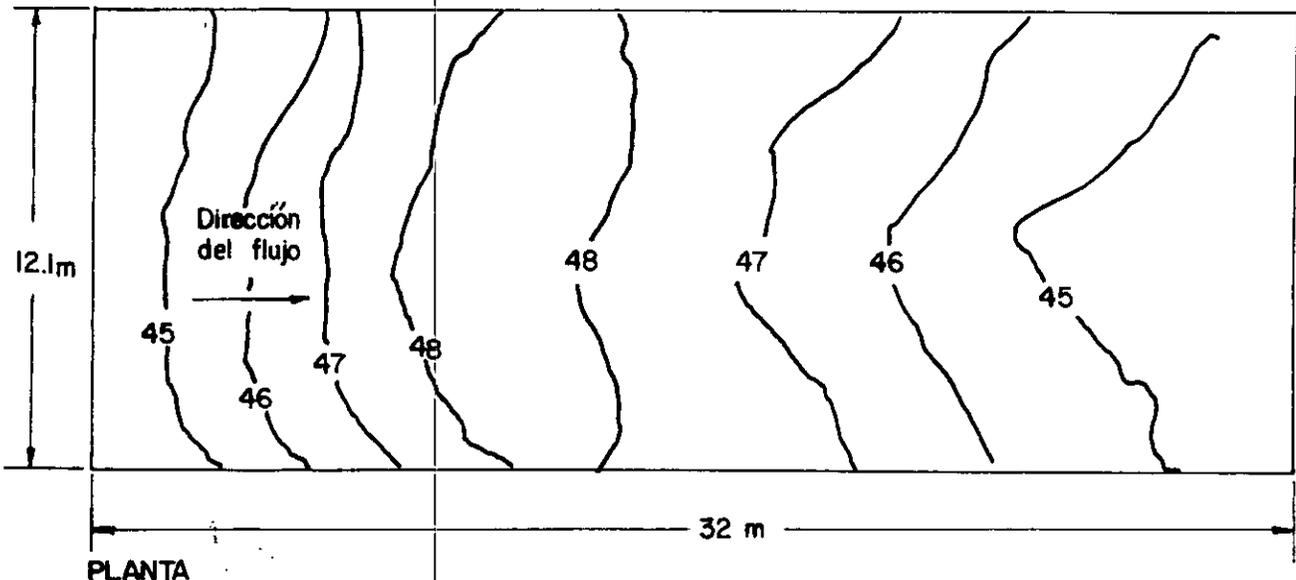
El ensayo realizado consistió en hacer un levantamiento de la topografía de los lodos. Para esto se dividió en cuadros el área de los sedimentadores evaluados y se midió en cada punto la profundidad del sedimentador y la altura de lodos. En la Figura 83 y 84 se presenta el topograma de lodos para las unidades evaluadas.

De la Figura 83, calculamos los volumen de lodos con los siguientes resultados:

En el 1er. tercio.	329,70 m <sup>3</sup>	34,13%
2do. tercio.	439,80 m <sup>3</sup>	45,52%
3er. tercio.	196,60 m <sup>3</sup>	20,35%

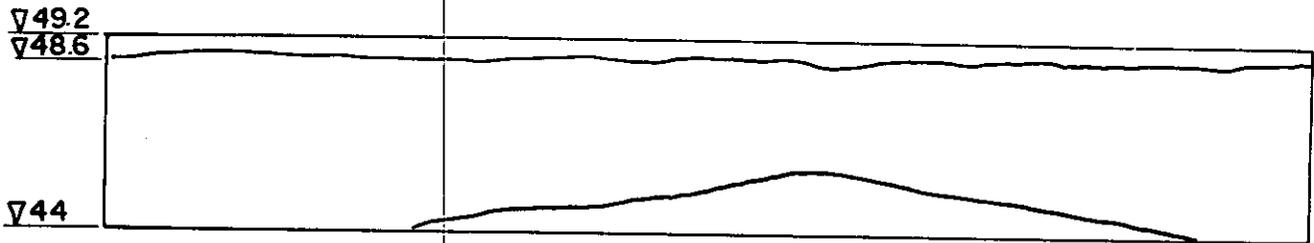
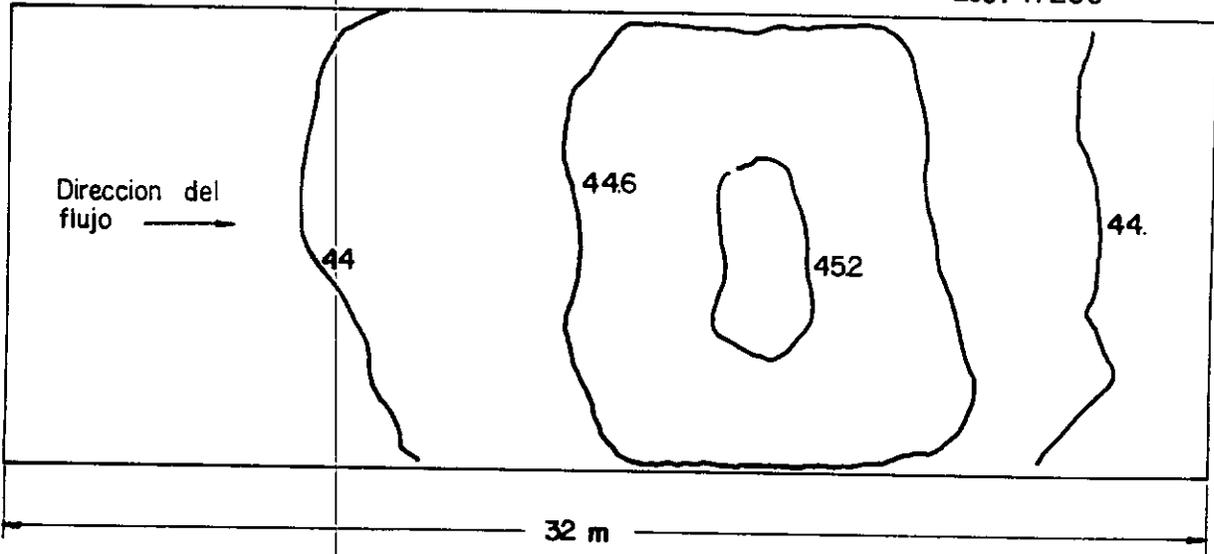
Hasta la mitad de la unidad, se encuentran depositados 557,18 m<sup>3</sup>, correspondientes al 57,7% del total.

FIGURA 83. TOPOGRAMA DE LODOS DEL SEDIMENTADOR S2-1, ANTES DEL LAVADO EN ENERO 20 / 90

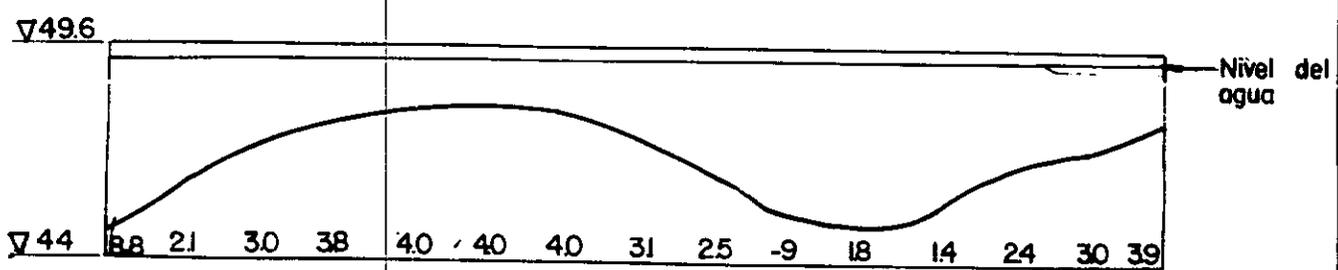
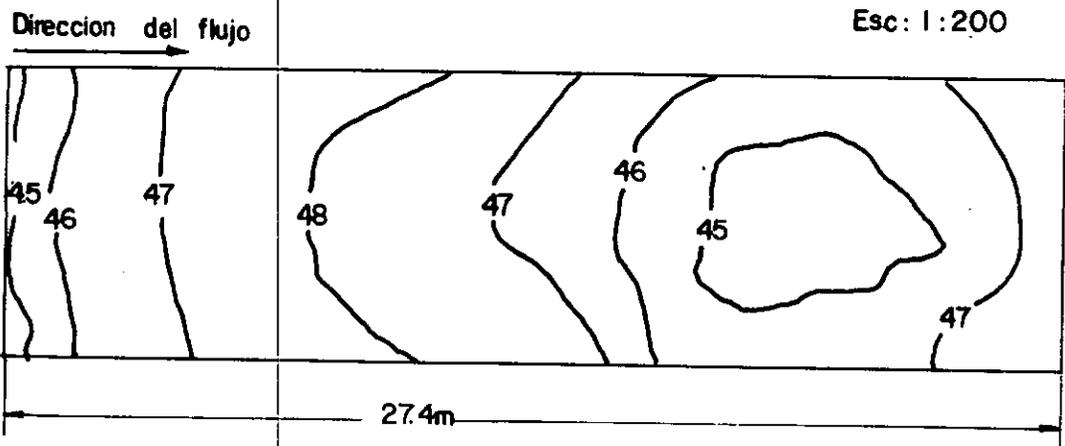


# FIGURA 84. TOPOGRAMA DE LODOS DE OTRAS UNIDADES.

TOPOGRAMA DE LODOS DEL SEDIMENTADOR S<sub>3-2</sub> . PLANTA DOS  
Esc: 1:200



TOPOGRAMA DE LODOS DEL FLOCULADOR F1<sub>2-1</sub> . PLANTA UNO.  
Esc: 1:200



Debemos concluir que no se da una buena floculación, aunque la distribución de lodos no es uniforme. El desplazamiento de la curva de lodos puede deberse a deficiencias en la zona de entrada, en donde se presentan gradientes de agitación altos.

**5.3.5.1. Características de las obras de desagües y descarga.** El desagüe de los sedimentadores se hace en cada uno de ellos por una válvula de 0,36 m de diámetro que es accionada manualmente desde el pasillo o puente central sobre el sedimentador. Esta descarga sobre una tubería de drenaje común para sedimentadores y floculadores. Hay un dren principal para cada planta, que confluyen y van a dar sobre un canal abierto que evacua estas aguas hacia la bahía de Cartagena.

El estado de las válvulas es bueno, aunque con frecuencia se desprende el vástago de accionamiento, al intentar operarla con el sedimentador recargado de lodos. No se acostumbra a hacer purga periódica de lodos, práctica esta con la que se evitaría el anterior problema.

Una fuga que se presente en una de las válvulas, es detectada al oído por el operador al hacer su inspección sobre los tubos de rebose de los sedimentadores.

#### 5.4 EVALUACION DE LA FILTRACION

La filtración es el proceso de remoción de las partículas suspendidas en el agua y coloidales, que no fueron removidos en los procesos de pre-tratamiento anteriores. Esto se consigue al hacer pasar el agua a través de un medio poroso, con las especificaciones necesarias de tamaño efectivo de los granos que lo conforman, coeficiente de desuniformidad y de esfericidad de los mismos, y peso específico, que garanticen su operabilidad con una alta eficiencia remocional.

Al evaluar este proceso ha de tenerse en cuenta los principios básicos del mismo, así como los factores que lo influyen.

Para lograr la filtración, deben darse dos mecanismos o procesos complementarios, a saber: 1) el transporte de las partículas suspendidas hasta los granos que conforman el lecho filtrante; y 2) la adherencia de dichas partículas a los gránulos del material filtrante.

Estos dos mecanismos resultan interactuantes debido a que las fuerzas que mantienen a las partículas removidas de la suspensión, adheridas al material filtrante, son activas para distancias relativamente pequeñas. Inicialmente las

partículas a ser removidas son transportadas de la suspensión hasta la superficie de los granos del material filtrante. Las partículas que permanezcan adheridas al material filtrante, forman una película sobre los granos superficiales del mismo, y se resisten a la acción de las fuerzas de cizallamiento debidas a la hidrodinámica del flujo, provocando una mayor remoción de nuevas partículas. Este proceso se denomina filtración de acción superficial, y es responsable por aproximadamente el 90% de la pérdida de carga total. Otras partículas no llegan a quedar adheridas en esta primera parte del lecho filtrante y logran penetrar más en él. Es la filtración por acción de profundidad, que produce una distribución de la pérdida de carga en todo el lecho filtrante.

Muchos son los factores que influyen el transporte y la adherencia de la partículas suspendidas, lo mismo que los modelos matemáticos propuestos para cuantificar la eficiencia remocional de cada uno de ellos.

Los principales mecanismos de transporte son: 1) impacto inercial; 2) intercepción; 3) sedimentación; 4) difusión; 5) acción hidrodinámica. En general, se ha llegado a la conclusión de que la eficiencia de remoción de partículas suspendidas es inversamente proporcional a la velocidad de aproximación, al diámetro de los granos del medio

filtrante y a la viscosidad del agua, y que la eficiencia es función de las características de la suspensión.

De otra parte, la adherencia es atribuida a dos fenómenos distintos, a saber: 1) la interacción entre las fuerzas eléctricas de repulsión y las de atracción de Van der Waals; 2) los puentes o ligazones químicos entre los partículas suspendidas y los granos del medio filtrante, ya sea por intercambio iónico, ligazones de hidrógeno o adsorción mutua.

Por todo esto se ha sugerido que la filtración no es sino un caso especial de la floculación, en el que algunas partículas son fijas (aquellas adheridas inicialmente a los granos del material filtrante), y otras suspendidas.

Son factores que influyen el proceso de filtración, los siguientes: 1) las características de la suspensión: tipo de partículas suspendidas, el tamaño y densidad de las mismas, la resistencia del floc, la temperatura del agua, la concentración de partículas suspendidas, el potencial Zeta y el pH de la suspensión; 2) las características del medio filtrante: tipo de medio filtrante; especificaciones de tamaño, uniformidad, esfericidad y peso de los granos del lecho filtrante; el espesor y conformación de las capas del lecho filtrante; 3) las características

hidráulicas: la tasa de filtración, la carga hidráulica disponible, y los métodos de operación del filtro; 4) la calidad del agua efluente.

La filtración, como último proceso, anterior a la desinfección, en la cadena de potabilización del agua, es responsable por la producción de agua de las calidades exigidas por las normas de sanidad del Ministerio de Salud, o por las adoptadas por la empresa encargada de prestar este servicio.

Al evaluar la filtración en las planta uno y dos, se procuró incluir todos los elementos enunciados anteriormente. Para esto se hizo un seguimiento de la carrera de filtración de las unidades de la planta uno, en donde fué posible instalar piezómetros.

Se evaluaron: 1) las características de la filtración: velocidad y caudal filtrado, pérdidas de carga, la calidad del filtrado inicial, la carrera óptima de filtración, y la eficiencia de la filtración; 2) las características del lecho filtrante; 3) el proceso de lavado de los filtros.

**5.4.1 Características del proceso de filtración.** Los filtros de las plantas uno y dos, por el método de operación de los mismos, son filtros con carga hidráulica

variable y resistencia del filtro variable, resultando la tasa de filtración de cada unidad, declinante.

El diseño inicial de estos filtros fué hecho para que trabajaran con carga hidráulica constante y resistencia del filtro también constante, es decir con tasa de filtración constante, para lo cual estaban dotados de los reguladores de caudal y nivel del tipo simplex, correspondientes. Ante el deterioro de estos equipos, se dejaron totalmente abiertas las válvulas de los reguladores.

Las principales características técnicas de los filtros evaluados, son:

1) En la planta uno. Seis filtros de dos caras cada uno. Dimensiones de la caja filtrante: 6,70 m x 5,90 m x 3,00 m de profundidad. Area del lecho filtrante: 6,70 m x 2,44 m por cara.

2) En la planta dos. Tres filtros de dos caras, con dimensiones de la caja filtrante de: 6,70 m x 11,60 m x 2,80 m de profundidad. Area del lecho filtrante: 6,70 m x 5,40 m por cara.

El lecho filtrante lo constituyen una capa de grava, de

espesor 30 cm; una capa de altura 30 cm, de arena; y una capa de antracita, con espesor de 40 cm. Mayores detalles sobre las características de estos filtros se encuentran bajo los literales 4.1.5 y 4.2.4 de este informe.

**5.4.1.1 Velocidad y caudal de filtración.** Se trataba de determinar el caudal normal filtración. Como ya se dijo, los filtros son de tasa de filtración declinante, por lo que aquí se determina es un valor promedio de la misma.

Para determinar la tasa de filtración se instaló una mira graduada sobre la pared del filtro en estudio; se cerró la válvula del afluente al filtro, y se permitió que este siguiera filtrando. Se tomaron lecturas del tiempo transcurrido mientras descendía el nivel de agua en el filtro un diferencial de altura escogido y así poder determinar el caudal filtrado. La prueba se hizo inicialmente con el nivel del agua por encima de las canaletas de desagüe del agua de lavado, y posteriormente, con el nivel del agua abajo de las mismas.

Esta determinación de caudales se hizo para los filtros F2-1, F5-1, F6-1, de la planta uno, y para el filtro F1-2, de la planta dos, tanto al inicio como al final de la carrera de filtración de los mismos. Los resultados son consignados en la Tabla 87.

TABLA 87. Caudales de filtración. Plantas uno y dos.

Unidad	Horas de carrera filtro	Tasa de filtración			Caudal medio m <sup>3</sup> /día
		Máxima m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /día	Mínima m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /día	Media m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /día	
F <sub>2-1</sub>	32	245,00	86,40	165,70	5.418,4
F <sub>5-1</sub>	36	305,00	115,00	210,00	6.867,0
F <sub>6-1</sub>	37	280,00	112,80	196,40	6.422,3
F <sub>1-2</sub>	23	322,00	55,00	188,50	13.639,9

Las tasas de filtración de las unidades cinco y seis de la planta uno son más altas que las otras, debiéndose a que se le hizo mantenimiento al lecho filtrante poco tiempo antes de las actividades de evaluación. Por la misma fecha fueron lavados y repuestos los lechos filtrantes de las unidades uno y dos de la planta dos, pero en estos, la pérdida de la capa de antracita es más evidente, resultando colmatado rápidamente el lecho de arena.

Al comparar el caudal total filtrado por las plantas uno y dos con el área total del lecho filtrante de las mismas, podemos calcular una tasa media de filtración, así:

$$\begin{aligned}
 \text{Tasa de filtración} &= \text{Caudal filtrado} / \text{Area lecho filtros} \\
 &= 55.000,0 \text{ m}^3/\text{día} / 413,3 \text{ m}^2 \\
 &= 133,08 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}.
 \end{aligned}$$

Esta tasa es demasiado baja para la operación de filtros

de alta rata como los de las plantas evaluadas. Por lo anterior, puede decirse que actualmente las instalaciones de filtración de las plantas uno y dos, estan siendo subutilizadas.

**5.4.1.2 Pérdida de carga.** El objeto de la evaluación en este punto, era el de caracterizar la pérdida de carga a lo largo de la carrera de filtración. Para esto se dispuso un piezómetro sobre la tubería efluente de cada uno de los filtros de la planta uno. En la planta dos, no fué posible la instalación de los mismo, pues no existen sobre la tubería las derivaciones necesarias.

Con la colaboración de los operadores de la planta, se tomaron lecturas de la altura piezométrica, antes y después del filtro, con frecuencia horaria.

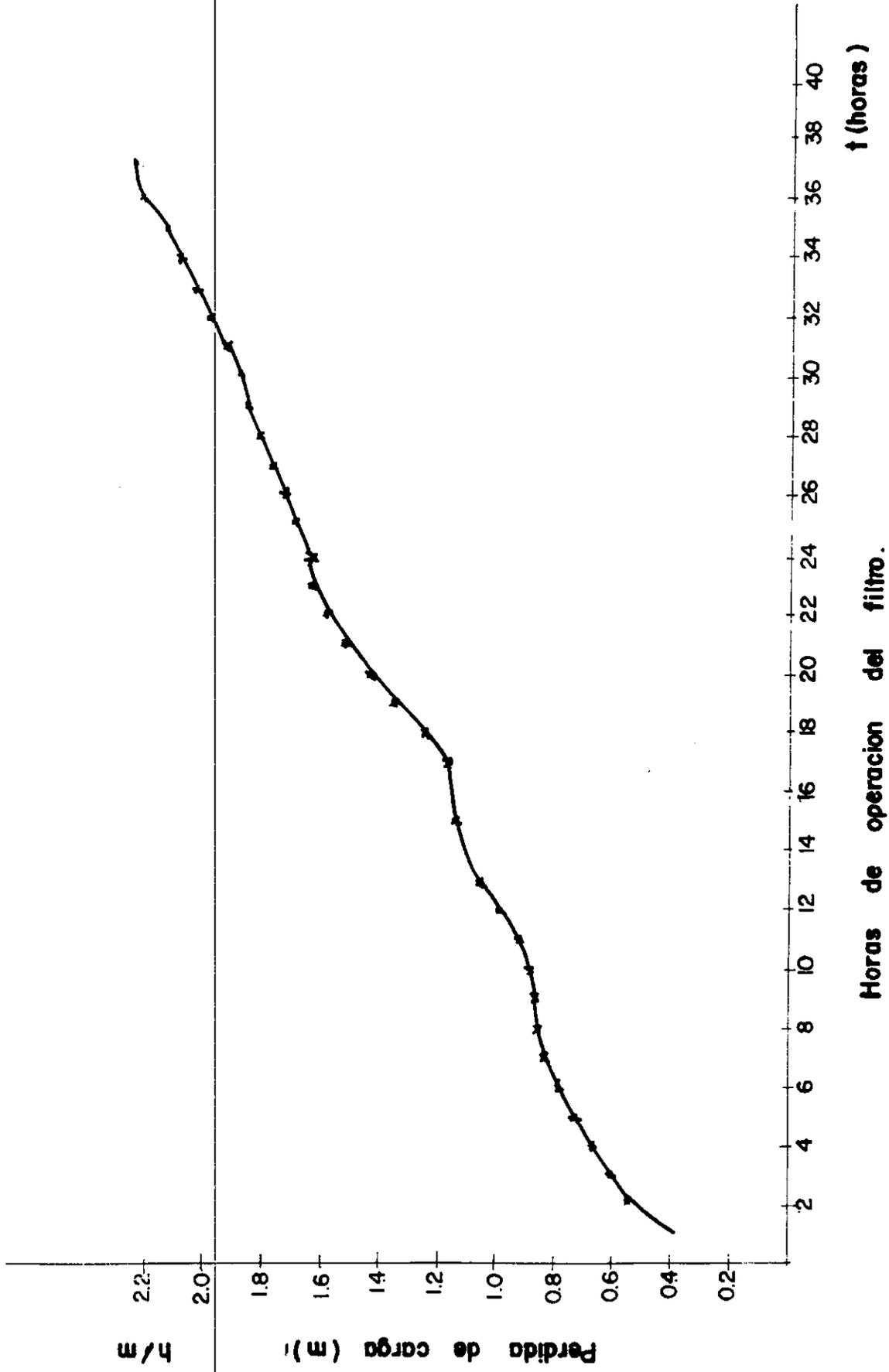
En la Tabla 88 se muestra uno de los reportes de dichas observaciones y en la Figura 85, se grafica la pérdida de carga en el tiempo para el filtro evaluado.

Del análisis de la información recogida, se concluye que la pérdida de carga inicial en el filtro es en promedio de 45 centímetros, y la máxima es de 2,20 m, que corresponde a una carrera de filtración de 32 horas de duración, en promedio.

TABLA 88. Datos de pérdida de carga durante la carrera de filtración.

Horas de trabajo	Hora de lectura	Lecturas piezómetro		Pérdida de carga (m)
		Antes del filtro (m)	después del filtro (m)	
1	10:00 pm	0,64	0,26	0,38
2	11:00 pm	0,78	0,24	0,54
3	12:00 pm	0,82	0,22	0,60
4	1:00 am	0,85	0,19	0,66
5	2:00 am	0,88	0,16	0,72
6	3:00 am	0,89	0,12	0,77
7	4:00 am	0,86	0,12	0,74
8	5:00 am	0,90	0,04	0,86
9	6:00 am	0,90	0,03	0,87
10	7:00 am	0,90	0,02	0,88
11	8:00 am	0,92	0,00	0,92
12	9:00 am	0,96	-0,04	1,00
13	10:00 am	0,98	-0,07	1,05
14	11:00 am	0,98	-0,13	1,11
15	12:00 m	0,99	-0,12	1,11
16	1:00 pm	1,00	-0,14	1,14
17	2:00 pm	1,02	-0,14	1,16
18	3:00 pm	1,03	-0,21	1,24
19	4:00 pm	1,04	-0,31	1,35
20	5:00 pm	1,03	-0,41	1,44
21	6:00 pm	1,03	-0,49	1,52
22	7:00 pm	1,04	-0,55	1,59
23	8:00 pm	1,04	-0,59	1,63
24	9:00 pm	1,02	-0,61	1,63
25	10:00 pm	1,04	-0,65	1,69
26	11:00 pm	1,04	-0,67	1,71
27	12:00 pm	1,06	-0,70	1,76
28	1:00 am	1,05	-0,76	1,81
29	2:00 am	1,06	-0,80	1,86
30	3:00 am	1,04	-0,83	1,87
31	4:00 am	1,06	-0,87	1,93
32	5:00 am	1,06	-0,92	1,98
33	6:00 am	1,06	-0,97	2,03
34	7:00 am	1,07	-1,02	2,09
35	8:00 am	1,06	-1,06	2,12
36	9:00 am	1,06	-1,15	2,21
37	10:00 am	1,06	-1,18	2,24
1	11:00 am	0,68	0,12	0,56

FIGURA 85 PERDIDA DE CARGA DURANTE LA CARRERA DE FILTRACION. FILTRO F<sub>2-1</sub>. PLANTA UNO



5.4.1.2.1 Fluctuaciones de presión en el filtro. Para detectar las fluctuaciones de presión en el filtro se procedió de la siguiente forma:

Seleccionadas las unidades a evaluar, los filtros de la planta uno, y ya instalados los piezómetros, se determinó el caudal de trabajo de cada uno.

Durante un minuto se determinó la amplitud de fluctuación del nivel de agua en el piezómetro, marcando las variaciones, en un papel colocado detrás del mismo.

Se determinó la máxima amplitud y se expresó como porcentaje de la pérdida de carga. Los resultados para los filtros evaluados son los consignados en la Tabla 89.

**TABLA 89.** Evaluación de las fluctuaciones de presión en los filtros de la planta uno.

Filtro No.	Caudal (l/s)	Pérdida de carga (m)	Fluctuación máxima (cm)	% de fluctuación
F <sub>1-1</sub>	83,0	1,08	3,0	2,80
F <sub>2-1</sub>	95,0	0,63	1,0	1,60
F <sub>3-1</sub>	72,0	1,12	4,0	3,60
F <sub>4-1</sub>	36,0	1,92	10,0	5,20
F <sub>5-1</sub>	88,0	0,87	2,0	2,30
F <sub>6-1</sub>	49,0	1,72	12,0	6,25

Los cambios bruscos en la rata de filtración ocasionan una distorsión de la calidad del agua filtrada, al producirse desprendimiento de partículas adheridas a los granos del material filtrante. Esto ocasiona oscilaciones en la pérdida de carga, las cuales, expresadas porcentualmente, permiten calificar la calidad del agua que esta produciendo cada unidad, según la Tabla 90.

**TABLA 90.** Calidad del agua en función del % de fluctuación de la pérdida de carga.

Calidad del agua	% de fluctuación de la pérdida de carga
Buena	< 2%
Mediana	4
Mala	6

**5.4.1.3 Calidad del filtrado inicial.** Se pretende con esta prueba caracterizar el comportamiento del filtro o filtros al inicio de la carrera y determinar el tiempo que tarda en alcanzar la turbidez afluente normal.

Se procedió de la siguiente forma:

- a. Se seleccionaron las unidades a evaluar: el filtro F1-3 de la planta dos y los filtros F2-1 y F3-1 en la planta 1.

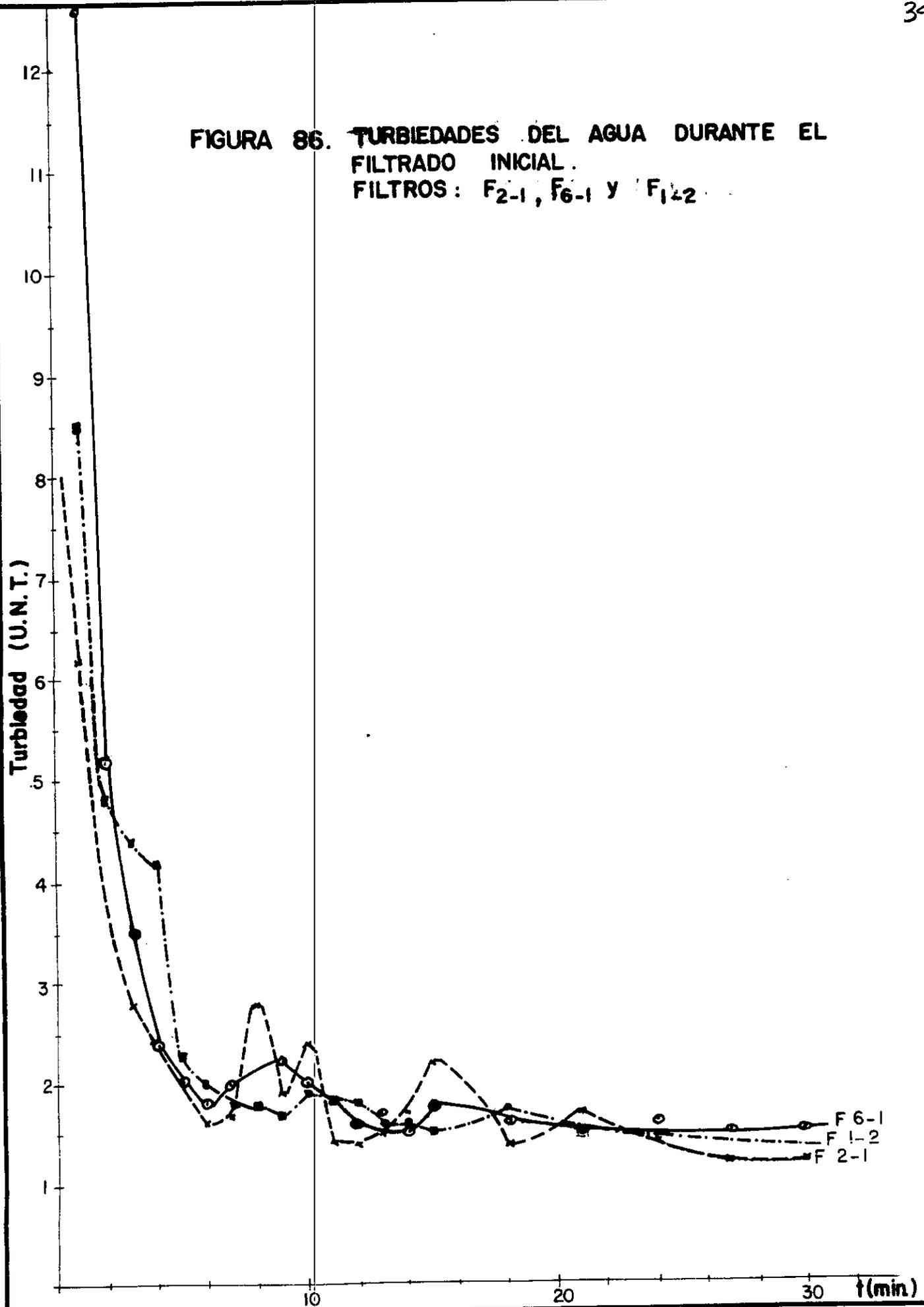
b. Se programó el lavado de estos filtros con la colaboración del Operador en turno. Inmediatamente él terminó la operación de lavado, en el filtro correspondiente se tomaron muestras de agua filtrada, de la tubería afluyente, antes de que esta se mezclara con la de otras unidades. El muestreo se hizo durante los primeros treinta minutos de operación del filtro.

c. En el laboratorio se procedió a determinar la turbiedad de cada una de las muestras.

d. Con los datos así obtenidos, (ver Tabla 91), se dibujaron las curvas de turbiedad versus tiempo y se determinó el intervalo inicial en que la turbiedad está por encima de la deseable. Durante este tiempo debería eliminarse el filtrado inicial. (Figura 86).

Se observa que durante el primer minuto alcanza a pasar por el efluente del filtro agua con turbidez superior a las 5 U.N.T., sin embargo en el segundo minuto ya están los filtros produciendo agua de calidad aceptable. Así, el agua de primer filtrado corresponde a la producida durante los dos primeros minutos. Para una tasa de filtrado inicial de  $300 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ , esto equivale a un poco más de  $12 \text{ m}^3$ . Dado que es un volumen muy pequeño y a que las turbiedades son bajas, no resulta objetable el que no se este botando el agua de primer filtrado.

FIGURA 86. TURBIDADES DEL AGUA DURANTE EL FILTRADO INICIAL.  
FILTROS: F<sub>2-1</sub>, F<sub>6-1</sub> y F<sub>1-2</sub>.



**TABLA 91.** Turbiedades del agua durante el filtrado inicial. Filtros F2-1, F3-1 y F1-2.

Número orden	Tiempo min	Turbiedad final obtenida (U.N.T.)		
		F2-1	F3-1	F1-2
1	1	6,2	12,8	8,5
2	2	3,8	5,2	4,8
3	3	2,8	3,5	4,4
4	4	2,4	2,4	4,2
5	5	2,0	2,0	2,2
6	6	1,6	1,8	2,0
7	7	1,7	1,8	1,8
8	8	2,8	2,0	1,8
9	9	1,9	2,2	1,7
10	10	2,4	2,0	1,9
11	11	1,4	1,8	1,8
12	12	1,4	1,6	1,8
13	13	1,5	1,7	1,6
14	14	1,7	1,5	1,6
15	15	2,2	1,7	1,5
16	18	1,4	1,6	1,7
17	21	1,7	1,5	1,5
18	24	1,4	1,6	1,5
19	27	1,2	1,5	1,4
20	30	1,2	1,5	1,4

5.4.1.4 Carrera óptima de filtración. La carrera óptima de filtración será aquel período de tiempo en que se alcance la máxima pérdida de carga posible y al mismo tiempo se produzca agua de turbiedad inferior a la máxima admisible según los patrones que se tengan establecidos.

Para determinar este tiempo, se estudia la variación de la pérdida de carga y la calidad del agua tratada, a medida que transcurre la operación del filtro seleccionado, el F2-1, en la planta uno.

- Instalados los piezómetros, se tomaron con frecuencia horaria, lecturas de pérdida de carga, al tiempo que se recogían muestras para determinar turbiedad del agua afluente y efluente del filtro.

- Se traza la curva de pérdidas de carga en el filtro y se determina la duración de la carrera  $T_1$ , como el tiempo en que se alcanzó la máxima pérdida.

- Se traza la curva de turbiedad de agua filtrada y encontramos la duración de la carrera de filtración  $T_2$ , igual al tiempo en el cual se producen turbiedades inferiores a la máxima admisible o deseable. Se toma como valor deseable de la turbiedad, para estas dos plantas, el de 3 U.N.T.

- Se calcula el número de Mintz como:  $IM = T_1 / T_2$

En las Tabla 92 se consignan los datos de ensayo, los mismos que aparecen en la Figura 87.

Para el filtro F2-1 :

$T_1 = 36$  horas      y       $T_2 = 32$  horas.

Número de Mintz:

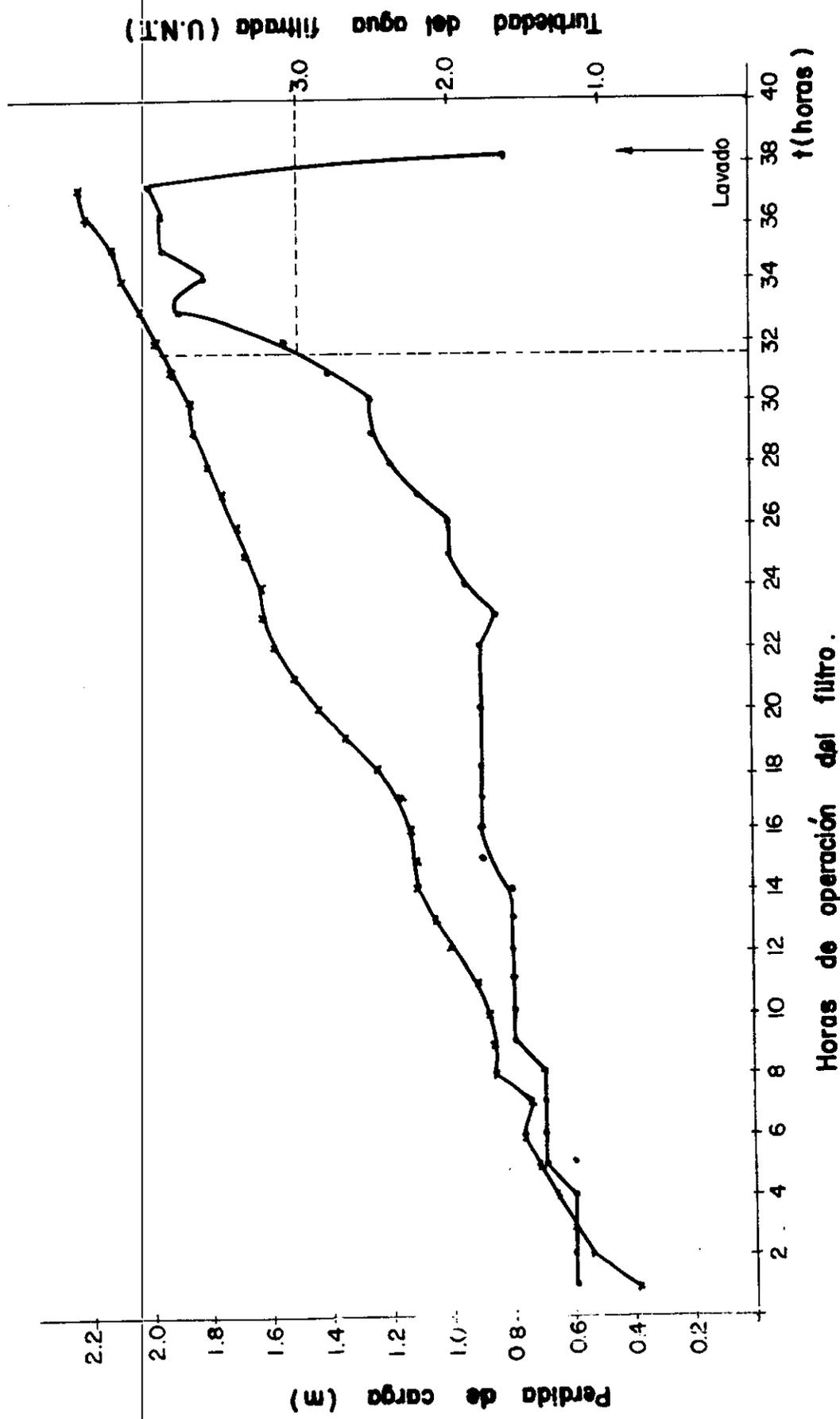
$$IM = T_1 / T_2 = 36 / 32 = 1.125$$

En general, los filtros son operados con carreras de filtración irregulares, que varían entre 24 y 40 horas.

TABLA 92. Pérdida de carga y calidad del agua producida durante la carrera de filtración. Filtro F2-1. Feb 14/90

Horas de trabajo	Hora de lectura	Lecturas piezómetro		Pérdida de carga (m)	Turbiedades		Observaciones
		Antes del filtro (m)	después del filtro (m)		Afluente (U.N.T.)	Efluente (U.N.T.)	
1	10:00 pm	0,64	0,26	0,38	2,1	1,2	
2	11:00 pm	0,78	0,24	0,54	2,1	1,2	
3	12:00 pm	0,82	0,22	0,60	2,1	1,2	
4	1:00 am	0,85	0,19	0,66	2,1	1,2	
5	2:00 am	0,88	0,16	0,72	2,1	1,4	
6	3:00 am	0,89	0,12	0,77	2,1	1,4	
7	4:00 am	0,86	0,12	0,74	2,1	1,4	
8	5:00 am	0,90	0,04	0,86	2,1	1,6	
9	6:00 am	0,90	0,03	0,87	2,1	1,6	
10	7:00 am	0,90	0,02	0,88	2,1	1,6	
11	8:00 am	0,92	0,00	0,92	2,1	1,6	
12	9:00 am	0,96	-0,04	1,00	2,1	1,6	
13	10:00 am	0,98	-0,07	1,05	2,1	1,6	
14	11:00 am	0,98	-0,13	1,11	2,1	1,6	
15	12:00 m	0,99	-0,12	1,11	2,1	1,8	
16	1:00 pm	1,00	-0,14	1,14	2,1	1,8	
17	2:00 pm	1,02	-0,14	1,16	2,1	1,8	
18	3:00 pm	1,03	-0,21	1,24	2,1	1,8	
19	4:00 pm	1,04	-0,31	1,35	2,1	1,8	
20	5:00 pm	1,03	-0,41	1,44	2,1	1,8	
21	6:00 pm	1,03	-0,49	1,52	2,1	1,8	
22	7:00 pm	1,04	-0,55	1,59	2,1	1,8	
23	8:00 pm	1,04	-0,59	1,63	2,1	1,7	
24	9:00 pm	1,02	-0,61	1,63	2,4	1,9	
25	10:00 pm	1,04	-0,65	1,69	2,5	2,0	
26	11:00 pm	1,04	-0,67	1,71	2,6	2,0	
27	12:00 pm	1,06	-0,70	1,76	2,5	2,2	
28	1:00 am	1,05	-0,76	1,81	2,7	2,4	
29	2:00 am	1,06	-0,80	1,86	2,8	2,5	
30	3:00 am	1,04	-0,83	1,87	2,8	2,5	
31	4:00 am	1,06	-0,87	1,93	2,8	2,8	
32	5:00 am	1,06	-0,92	1,98	2,8	3,1	
33	6:00 am	1,06	-0,97	2,03	2,8	3,8	
34	7:00 am	1,07	-1,02	2,09	2,8	3,6	
35	8:00 am	1,06	-1,06	2,12	2,8	3,9	
36	9:00 am	1,06	-1,15	2,21	2,8	3,9	
37	10:00 am	1,06	-1,18	2,24	2,8	4,0	Lavado del filtro
1	11:00 am	0,68	0,12	0,56	2,8	1,7	

FIGURA 87. PERDIDA DE CARGA Y CALIDAD DEL AGUA PRODUCIDA DURANTE LA CARRERA DE FILTRACION. FILTRO F2-1.



5.4.1.5 Eficiencia del proceso de filtración. Se mide la eficiencia del proceso en función de la calidad del agua filtrada y de la correlación entre turbiedades del agua sedimentada y del agua filtrada.

5.4.1.5.1 En función del agua filtrada. El propósito es determinar el porcentaje del tiempo en que la calidad del agua producida es aceptable. Para ello se consultaron los archivos de la planta correspondientes al año de 1989. Se recopilaron los datos correspondientes a turbiedad de agua sedimentada y de filtrada. Se ordenaron y analizaron estadísticamente. (Tablas 93, 94 y 95).

Al graficar estos datos, Figura 88, se observa que el 93% del tiempo, las plantas uno y dos, producen agua de turbiedad inferior a las 5 U.N.T.; que en el 70% del tiempo, las turbiedades producidas son inferiores a las 3 U.N.T.; y que sólo en un 4,8% del tiempo, se alcanza a producir agua de turbiedad menor que uno, que es el valor deseable.

Se concluye que la eficiencia de la filtración es aceptable.

**TABLA 93.** Turbiedades de agua en la Planta uno, en el periodo de Enero a Diciembre/89. (En U.N.T.)

PLANTA DE TRATAMIENTO UNO - ACUEDUCTO DE CARTAGENA DE INDIAS

DIA	ENERO		FEBRERO		MARZO		ABRIL		MAYO		JUNIO		JULIO		AGOSTO		SEP/BRE		OCTUBRE		NOV/BRE		DIC/BRE	
	AS	AF	AS	AF	AS	AF	AS	AF	AS	AF	AS	AF	AS	AF	AS	AF	AS	AF	AS	AF	AS	AF	AS	AF
1			2,3	3,5	2,4	1,6	3,3	0,5			2,7	2,4	3,0	2,7	2,0	1,4	3,1	3,4	3,1	3,7	2,8	2,6	1,7	1,9
2	2,4	3,9			4,0	2,5			3,4		4,1	1,2	3,8	2,0	2,4	1,6			4,3	4,9	2,6		1,4	1,3
3	1,1	1,2	3,5	1,6	2,1	2,4	3,2	0,8	3,4		2,3	1,3	3,0	2,3	3,4	2,0	4,8	3,8	4,5	4,4	2,1	2,0		
4	2,0	3,9	3,8	1,1	2,7	2,4	3,1	1,4	3,2		2,7	3,0	3,7	2,5			8,9	5,8	4,0	3,6	2,4	2,0	2,7	2,6
5	2,1						4,5	1,7	3,5	2,5			3,9	3,0			7,2	7,1	3,1	3,0			4,3	2,5
6	7,1	5,2	4,3	2,0	2,7	3,1	3,5	1,2			2,3	3,4	3,6	2,0			5,7	6,1	2,9	2,3			2,0	1,6
7	4,2	8,9	3,1	7,5	4,5	3,5	3,7	0,6			2,1		4,6	3,2			4,7	5,4			3,1	2,7	1,7	1,1
8			4,9	4,6	4,3	2,1	3,2	0,8			3,2	2,9	4,2	3,5	4,1	4,6	4,1	3,9			2,5	2,0		
9			2,8	2,0	15,0	4,6			4,6	3,4	20,0	12,0			2,4	2,1			3,5	2,8	3,6	2,7	2,1	2,0
10	2,8	1,9	2,5	2,0	5,7	5,5	2,3	1,2	3,7	1,6			2,5	2,0	2,0	0,6			2,3	2,3				
11	2,5	2,7	4,0	3,5	16,0	4,6	2,0	1,4	2,5	1,8			4,5	2,3	4,0	3,4	3,2	3,7	3,4	3,1			2,6	2,6
12	7,5	4,1	5,5	2,5	12,0	6,4	2,5	0,9	3,4	0,9	3,6	2,6	2,8	2,4			3,9	3,4	2,0	2,1			2,3	2,8
13	3,5	2,8	2,5	3,1	3,5	1,5	2,5	2,3			2,7	1,7	3,0	2,6			2,5	2,3	1,8	1,9			2,6	2,3
14	3,0	5,0	2,7	2,4	3,6	1,5	3,1	1,1			2,6	3,1	3,5	3,8	3,7	1,5	4,5	3,6	8,0	4,1	2,2	2,4	2,3	1,8
15	2,7	2,4	1,9	2,8	3,4	1,9	2,5	0,9	3,0	1,6	2,4	1,4			2,0	1,6			2,8	2,0	2,5	2,4	3,2	2,4
16	3,1	1,8	2,9	2,3	4,0	1,4	2,3		4,0	1,6	2,2	2,3			6,0	2,0					2,1	2,0		
17	2,8	2,3	3,7	1,9	3,2	1,1			3,9	1,0			2,7	3,0	2,1	1,9	3,5	3,1	2,0	2,3	2,4	2,3		
18	2,0	1,8	3,0	1,2	3,6	1,8	2,9	1,4	4,0	3,2			2,8	2,1	2,0	1,9	2,9	2,8	2,0	1,5	4,2	3,6	2,0	1,1
19	3,4	9,5			2,6	1,8			2,8	2,3	3,5	3,4	2,4	2,4			4,4	3,5	5,2	2,7			1,9	1,8
20	2,4	2,4	3,7	1,9			2,4	0,6			3,4	2,4			6,5	3,6	2,6	2,3	3,0	3,0	2,7	2,9	1,7	1,5
21			4,1	4,7	3,2	1,2	3,5	1,1			1,8	2,3	3,1	1,9			3,5	3,9			2,4	1,5	2,9	1,8
22			2,5	2,0	9,2	5,0	3,5	3,0	2,6	0,9	6,1	5,4			7,2	7,5	4,7	3,5			2,4	2,0	2,0	1,8
23	2,7	2,4	2,0	1,5			3,4	1,7	3,1	1,4	2,4	3,8			2,0	2,3			3,9	3,5	2,6	2,8	2,0	1,8
24	4,2	2,6	4,5	2,0	4,4	1,4	4,5	4,1	4,6	1,9	4,6	3,6	4,2	2,9	3,0	3,0					2,7	2,4		
25	3,6	3,9	2,5	1,0	7,5	3,1			5,1	1,5	4,0	2,1	3,0	4,0	2,1	2,0	4,6	3,4	2,8	3,0				
26	4,0	2,5	2,4	0,9	5,2	1,6	3,3	2,3	2,1	1,5	4,7	4,2	2,8	2,6	2,8	1,8	4,0		2,8	1,2	2,3	2,5	1,7	1,9
27	2,9	2,7	2,8	1,6	7,3	5,3	3,1	1,2			3,4	3,1	2,3	1,5			3,4	2,3	2,0	1,8	2,3	2,1	3,9	2,5
28			2,6	1,4	19,0	15,0	2,1		4,9	1,7	5,8	4,5	3,6	3,1	1,5	1,3	5,5	5,1			2,6	2,4	1,7	1,4
29	2,8	3,1			4,8	1,8			2,6	0,9	5,9	6,7	3,1	2,3	2,4	2,3	4,1	4,3	2,9	2,8	1,3	1,2	1,2	1,0
30	4,0	2,6			3,5	0,8	3,7		4,0	1,3	3,7	3,1			1,8	1,4			2,5		1,9	1,6		
31	3,0	1,3			4,2	1,0			3,0	1,2			3,6	4,1	1,8	1,7			2,0	2,3				
MIN	1,1	1,2	1,9	0,9	2,1	0,8	2,0	0,5	2,1	0,9	1,8	1,2	2,3	1,5	1,5	0,6	2,5	2,3	1,8	1,2	1,3	1,2	1,2	1,0
MAX	7,5	9,5	5,5	7,5	19,0	15,0	4,5	4,1	5,1	3,4	20,0	12,0	4,6	4,1	7,2	7,5	8,9	7,1	8,0	4,9	4,2	3,6	4,3	2,8
No.	25	24	25	25	28	28	24	21	22	19	25	24	25	25	22	22	22	21	25	24	22	21	22	22
MED	3,3	3,4	3,2	2,4	5,8	3,1	3,1	1,4	3,5	1,7	4,1	3,4	3,3	2,7	3,1	2,3	4,4	3,9	3,2	2,8	2,5	2,3	2,3	1,9

TABLA 94. Turbiedades de agua en la Planta uno, en el período de Enero a Diciembre/89. (En U.N.T.)

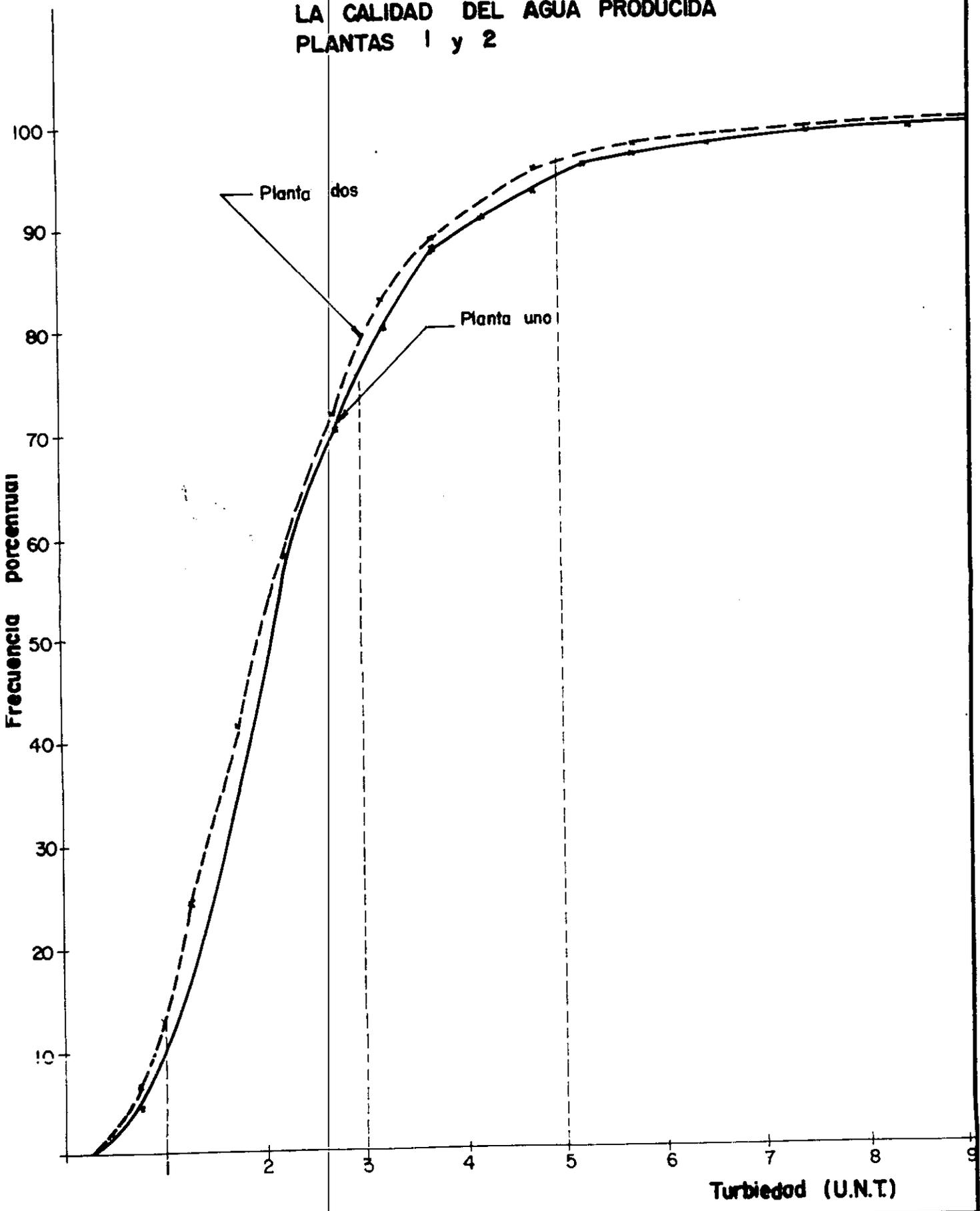
PLANTA DE TRATAMIENTO DOS - ACUEDUCTO DE CARTAGENA DE INDIAS

DIA	ENERO		FEBRERO		MARZO		ABRIL		MAYO		JUNIO		JULIO		AGOSTO		SEP/BRE		OCTUBRE		NOV/BRE		DIC/BRE	
	AS	AF	AS	AF	AS	AF	AS	AF	AS	AF	AS	AF	AS	AF	AS	AF	AS	AF	AS	AF	AS	AF	AS	AF
1			3,0	1,1	2,9	0,9	7,0	2,0			4,1	1,4	5,5	2,1	3,5	1,5	4,0	3,5	3,2	3,4	2,7	2,4	2,0	1,8
2	2,0	1,0			3,1	2,6			3,6	0,9	6,3	1,0	4,0	2,1	3,1	3,0			4,5	4,4	3,1	2,4	2,3	1,0
3	1,5	1,1	3,0	3,7	2,9	0,7	3,7	2,2	4,4	1,4	3,0	1,8	4,0	2,5	3,1	1,9	4,9	4,0	5,4	4,6	2,7	2,3		
4	3,4	0,6	4,4	2,3	3,0	1,0	4,3	2,1	3,9	1,2	3,0	0,7	3,5	2,4			6,1	5,7	3,9	3,5	2,3	1,7	3,5	2,7
5	2,6	3,2					5,2	3,0	4,6	1,5			5,0	2,7			7,6	7,4	2,7	2,9			6,7	2,3
6	9,0	7,3	5,1	4,0	2,6	1,0	4,8	2,8			3,3	3,5	3,5	1,8			7,0	6,4	3,0	2,8			2,5	1,5
7	4,0	1,9	4,5	0,7	4,7	2,7	4,4	2,5			3,4	2,8	6,9	3,1			6,3	6,0			2,6	2,9	2,2	1,5
8			3,2	1,8	4,2	1,3	4,7	2,6			2,6	0,7	2,5		4,2	1,9	4,8	4,6			2,4	2,3		
9			4,4	2,1	7,5	2,7			4,6	3,2	16,0	10,0			3,2	1,7			3,1	2,6	2,9	2,3	2,3	1,7
10	4,1	2,3	3,6	3,0	5,4	1,5	3,6	1,0	4,7	3,5			1,9	1,5	3,4	0,5			3,0	2,1				
11	4,0	2,8	3,6	1,4	15,0	4,3	3,7	0,6	3,6	3,0			2,9	1,5	6,2	6,0	4,3	3,9	3,0	3,0			5,0	3,4
12	9,5	6,7	3,9	2,9	14,0	3,4	3,2	2,4	4,0	1,0	5,5	3,2	2,9	2,6			4,0	4,0	1,9	1,7			2,7	2,5
13	4,6	4,7	4,1	1,9	4,0	1,1	3,5	1,0			3,0	2,4	3,5	2,4			4,0	3,7	2,0	1,6			2,3	2,2
14	2,7	1,4	3,0	2,0	3,5	1,1	4,0	2,2			2,9	2,0	6,0	2,9	2,5	1,8	3,7	3,5	11,0	4,5	2,7	2,5	4,0	1,0
15	1,9	1,0	2,0	0,8	5,0	1,4	3,4	1,0	4,0	3,8	3,1	3,0			2,8	2,1			3,2	2,3	5,0	2,4	2,6	1,8
16	4,0	4,2	2,2	1,2	5,1	1,2	2,5		5,7	0,9	3,4	3,1	3,1	2,6	2,9	1,1					2,4	1,8		
17	4,3	2,8	4,8	2,1	3,6	1,0			6,5	4,5			4,0	2,8	2,5	1,8	3,6	2,8	2,2	1,6	2,0	1,9		
18	2,4	1,3	4,0	3,0	2,1	1,5	3,5	1,0	4,6	4,4			3,7	3,1	2,5	2,4	3,5	3,1	3,0	1,3	2,7	2,3	1,8	0,9
19	5,2	3,2			3,8	2,8			4,2	1,0	3,9	3,8	3,1	2,3			3,8	3,7	4,2	2,6			2,0	1,6
20	3,2	2,0	3,4	1,1			2,6	0,5			3,2	3,1			4,4	3,2	2,9	2,5	3,4	3,2	3,2	2,7	2,6	1,7
21			4,8	1,4	2,6	1,1	3,0	1,0			3,2	2,8	4,4	3,2			3,7	3,6			2,5	1,3	1,3	1,2
22			3,2	2,0	8,7	1,3	3,6	0,8	4,3	3,8	5,6	5,6			7,0	4,3	3,9	3,2			2,3	2,1	2,1	0,9
23	2,7	0,8	2,7	1,0			3,6	1,4	3,4	2,6	2,9	2,7			2,5	2,0			5,0	2,0	3,0	2,9	2,0	1,6
24	5,3	1,8	3,4	1,6	7,0	1,5	4,4	1,3	6,1	5,0	3,2	2,1	4,1	2,8	2,5	2,0			3,4	3,6	2,4	1,9		
25	2,5	2,0	1,7	0,7	8,6	3,5			5,3	1,3	6,0	4,9	6,5	3,1	2,3	1,6	6,0	5,7	2,9	3,0				
26	4,9	3,9	3,3	1,0	9,1	2,1	4,6	1,2	3,0	2,8	4,2	2,7	4,3	4,3	2,4	1,2	6,4	4,5	2,9	1,6	3,0	2,1	1,8	1,8
27	3,9	1,0	3,2	1,4	14,0	8,6	2,9	0,9			3,0	2,5	4,6	4,0			3,3	3,0	2,6	1,4	2,4	1,4	2,6	1,9
28			3,4	1,3	22,0	17,0	2,9	0,9	5,6	2,4	7,4	5,6	2,6	1,8	2,3	1,9	5,2	5,0			3,0	2,5	1,9	1,8
29	4,0	1,3			6,9	1,8			3,7		2,4	2,3	3,8	3,4	2,7	2,1	4,2	4,1	2,6	2,4	1,7	1,5	1,9	2,0
30	4,6	2,0			5,2	3,2	4,1	3,2	4,8	1,5	4,4	3,0			1,9	1,8			4,2	3,0	2,0	1,5		
31	3,2	2,7			6,7	3,4			4,0	1,7			4,9	4,8	2,1	1,9			2,7	2,4				
MIN	1,5	0,6	1,7	0,7	2,1	0,7	2,5	0,5	3,0	0,9	2,4	0,7	1,9	1,5	1,9	0,5	2,9	2,5	1,9	1,3	1,7	1,3	1,3	0,9
MAX	9,5	7,3	5,1	4,0	22,0	17,0	7,0	3,2	6,5	5,0	16,0	10,0	6,9	4,8	7,0	6,0	7,6	7,4	11,0	4,6	5,0	2,9	6,7	3,4
No.	25	25	25	25	28	28	24	23	22	21	25	25	25	24	22	22	22	22	25	25	22	22	22	22
MED	4,0	2,5	3,5	1,8	6,5	2,7	3,9	1,6	4,5	2,4	4,4	3,1	4,0	2,7	3,2	2,2	4,7	4,3	3,6	2,7	2,7	2,1	2,6	1,8

**TABLA 95.** Eficiencia del proceso de filtración en función de la calidad del agua producida. Plantas 1 y 2.

Calidad agua producida		En la Planta Uno				En la Planta Dos			
Rango de Turbiedad (U.N.T.)	Promedio (U.N.T.)	Frecuencia Presentada		Frecuencia Acumulada		Frecuencia Presentada		Frecuencia Acumulada	
		n	%	n	%	n	%	n	%
0,00 - 0,49	0,25	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
0,50 - 0,99	0,75	13	4,8	13	4,8	19	6,8	19	6,8
1,00 - 1,49	1,25	36	13,2	49	18,0	50	17,8	69	24,6
1,50 - 1,99	1,75	49	18,0	98	36,0	48	17,1	117	41,6
2,00 - 2,49	2,25	61	22,4	159	58,5	45	16,0	162	57,7
2,50 - 2,99	2,75	33	12,1	192	70,6	40	14,2	202	71,9
3,00 - 3,49	3,25	26	9,6	218	80,1	31	11,0	233	82,9
3,50 - 3,99	3,75	21	7,7	239	87,9	15	5,3	248	88,3
4,00 - 4,49	4,25	8	2,9	247	90,8	12	4,3	260	92,5
4,50 - 4,99	4,75	7	2,6	254	93,4	8	2,8	268	95,4
5,00 - 5,49	5,25	7	2,6	261	96,0	2	0,7	270	96,1
5,50 - 5,99	5,75	2	0,7	263	96,7	4	1,4	274	97,5
6,00 - 6,99	6,50	3	1,1	266	97,8	3	1,1	277	98,6
7,00 - 7,99	7,50	3	1,1	269	98,9	2	0,7	279	99,3
8,00 - 8,99	8,50	1	0,4	270	99,3	1	0,4	280	99,6
9,00 - 9,99	9,50	1	0,4	271	99,6	0	0,0	280	99,6
> 10,00		1	0,4	272	100,0	1	0,4	281	100,0

FIGURA 88. EFICIENCIA DE LA FILTRACION EN FUNCION DE LA CALIDAD DEL AGUA PRODUCIDA PLANTAS 1 y 2



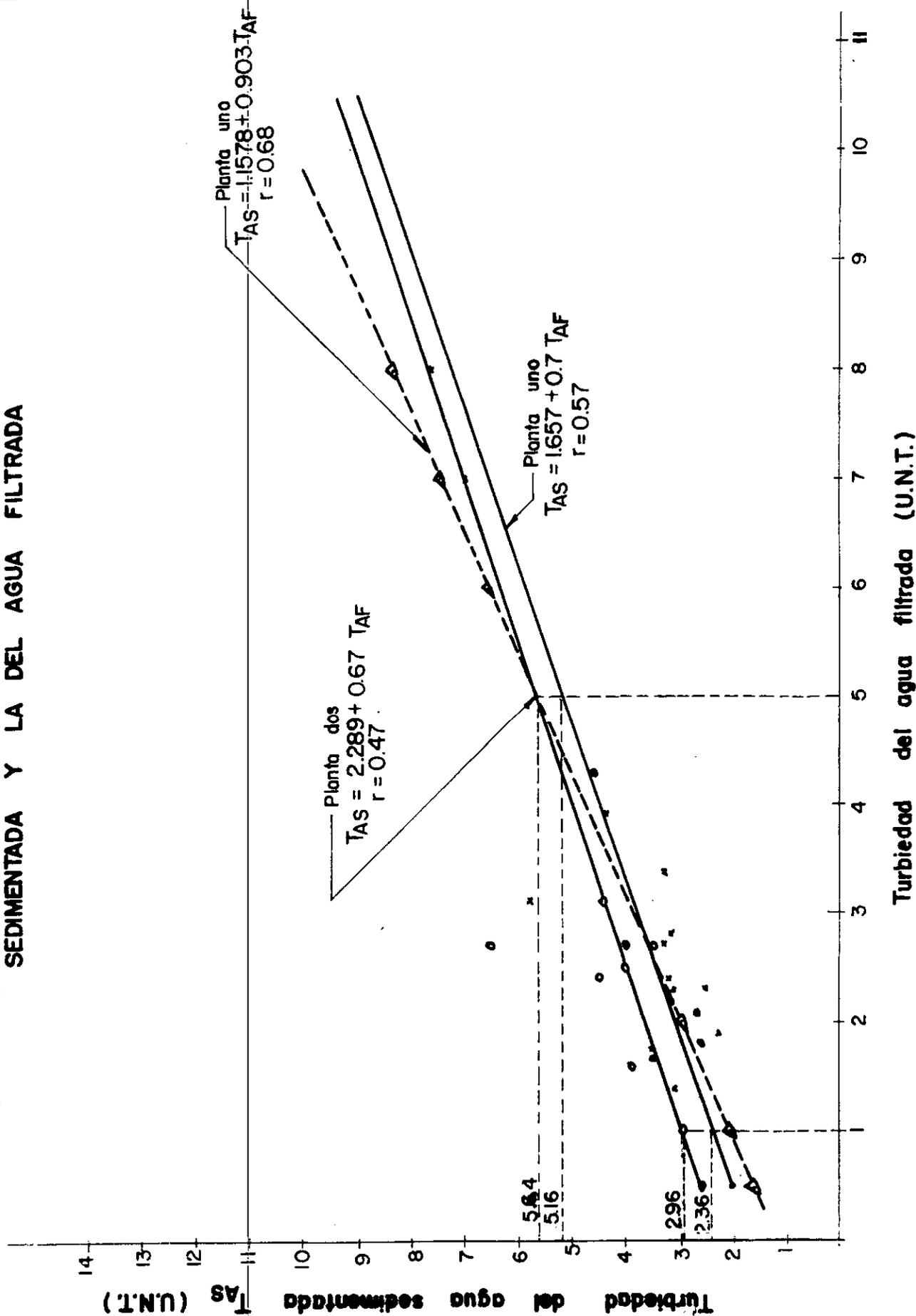
5.4.1.5.2 **Correlación de la turbiedad agua decantada-agua filtrada.** El objeto de este análisis es encontrar la eficiencia remocional del filtro por comparación con eficiencias estandares establecidos en países que se supone poseen mayor experiencia en el control de los procesos de purificación del agua. Dado que la bibliografía conseguida sobre estos estandares resultó muy escasa, aquí se determina sólo la correlación existente entre la turbiedad del agua sedimentada y la del agua producida. Esto debe permitir predecir los valores de turbidez del agua producida, a partir de la turbidez del agua sedimentada.

Para establecer esta correlación se grafica en la Figura 89, la recta de mejor ajuste a los pares (X,Y), donde las abscisas son los valores promedio mensual de turbiedad del agua filtrada y las ordenadas los valores del agua sedimentada correspondientes. (Tablas 96 y 97). Se incluye una segunda recta para la planta uno, determinada también por el método de mínimos cuadrados, pero aplicado a la totalidad de los valores de turbiedad diarios tomados durante el año 1989, y no a los promedios, como se hizo inicialmente.

De la ecuación de esta recta, tenemos que:

$$T_{AF} = \{T_{AS} - 1,1578\} / 0,90343 \text{ U.N.T.}$$

FIGURA 89. CURVA DE CORRELACION ENTRE LA CALIDAD DEL AGUA SEDIMENTADA Y LA DEL AGUA FILTRADA



**TABLA 96.** Turbiedades promedio de agua sedimentada y de agua filtrada, en U.N.T. Planta uno. Ene-Dic/89.

Mes	Valores de turbiedad (U.N.T.)					
	Agua sedimentada			Agua filtrada		
	Mín.	Prom.	Máx.	Mín.	Prom.	Máx.
Enero	1,1	3,3	7,5	1,2	3,4	9,5
Febrero	1,9	3,2	5,5	0,9	2,4	7,5
Marzo	2,1	5,8	19,0	0,8	3,1	15,0
Abril	2,0	3,1	4,5	0,5	1,4	4,1
Mayo	2,1	3,5	5,1	0,9	1,7	3,4
Junio	1,8	4,1	20,0	1,2	3,4	12,0
Julio	2,3	3,3	4,6	1,5	2,7	4,1
Agosto	1,5	3,1	7,2	0,6	2,3	7,5
Septiembre	2,5	4,4	8,9	2,3	3,9	7,1
Octubre	1,8	3,2	8,0	1,2	2,8	4,9
Noviembre	1,3	2,5	4,2	1,2	2,3	3,6
Diciembre	1,2	2,3	4,3	1,0	1,9	2,8

**TABLA 97.** Turbiedades promedio de agua sedimentada y de agua filtrada. Planta dos. Ene-Dic/89.

Mes	Valores de turbiedad (U.N.T.)					
	Agua sedimentada			Agua filtrada		
	Mín.	Prom.	Máx.	Mín.	Prom.	Máx.
Enero	1,5	4,0	9,5	0,6	2,5	7,3
Febrero	1,7	3,5	5,1	0,7	1,8	4,0
Marzo	2,1	6,5	15,0	0,7	2,7	17,0
Abril	2,5	3,9	7,0	0,5	1,6	3,0
Mayo	3,0	4,5	6,5	0,9	2,4	5,0
Junio	2,4	4,4	16,0	0,7	3,1	10,0
Julio	1,9	4,0	6,9	1,5	2,7	4,3
Agosto	1,9	3,2	7,0	0,5	2,2	6,0
Septiembre	2,9	4,6	7,6	2,8	4,3	7,4
Octubre	1,9	3,6	11,0	1,3	2,7	4,6
Noviembre	1,7	2,7	5,0	1,3	2,1	2,9
Diciembre	1,3	2,6	6,7	0,9	1,8	3,4

Se puede decir también que la eficiencia remocional resulta baja al considerar el estrecho rango de turbiedades afluentes para las cuales el filtro produce agua de turbiedad inferior a 5 U.N.T.

5.4.2 Características del lecho filtrante. Los materiales filtrantes son especificados con base, en por lo menos, cuatro características:

- Tamaño Efectivo (T.E.): es el tamaño de los granos que corresponden a la abertura de la malla que deja pasar el 10 % en peso del material filtrante, al tamizarlo por las por las mallas de una serie granulométrica,
- Coeficiente de desuniformidad ( $C_u$ ): es igual a la relación entre el tamaño de los granos correspondiente al 60% y el tamaño de los granos correspondientes al 10%, obtenidos al pasar la muestra por las mallas de una serie granulométrica.
- Forma: La forma de los granos ha sido normalmente evaluada en función de el coeficiente de esfericidad ( $C_e$ ), que es igual a la relación entre el diámetro de una esfera de velocidad de sedimentación igual a la del grano considerado y el tamaño medio de los granos entre dos mallas consecutivas de la serie granulométrica, entre los cuales el material fué preparado.
- Peso específico ( $P_e$ ): es igual al peso de los granos dividido por el volumen efectivo que ocupan los granos.

Para filtros de alta rata se recomiendan los siguientes valores para estos parámetros, aunque son variables, dependiendo entre otras cosas, de la calidad de agua a tratar y la resistencia del flóculo logrado en el pretratamiento.

<b>Arena:</b>	Tamaño efectivo, de 0,4 mm a 0,5 mm
	Coefficiente de desuniformidad, 1,5 a 1,6
	Peso específico: 2,65
<b>Antracita:</b>	Tamaño efectivo, 0,70 a 1,4 mm
	Coefficiente de desuniformidad, 1,5 a 1,7
	Peso específico: 1,50

A nivel de la planta, se quiso verificar que los materiales filtrantes estuvieran dentro de estos rangos, para lo que se procedió a hacer el estudio granulométrico.

**5.4.2.1 Granulometría del lecho filtrante.** El objetivo de esta prueba es determinar el tamaño efectivo de los granos del lecho filtrante y establecer la incidencia que este pudiera estar presentado sobre la calidad del agua producida. Para este efecto se procedió así:

- 1) Se tomó una muestra por cuarteo de la arena del lecho del filtro tres de la planta uno. Esta operación se hizo inmediatamente después de haberse concluido el lavado del mismo. El filtro evaluado no presentaba la capa de antracita.

2) Se secó el material a 110°C durante 24 h y se pesó la muestra. Se lavó por el tamiz 200 y se volvió a secar. Al día siguiente se procedió a hacer la granulometría con los resultados de la Tabla 98.

TABLA 98. Granulometría del lecho filtrante

		$P_1 = 632,8$	$P_2 = 577,28$		
Tamiz número	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	% retenido	% que pasa	
8	2,360	1,15	0,18	99,8	
10	2,000	2,04	0,32	99,5	
20	0,850	8,80	14,05	85,5	
40	0,425	434,50	68,77	16,7	
60	0,250	8,50	1,35	15,3	
100	0,150	17,10	2,71	12,6	
200	0,075	22,30	3,53	9,1	
Fondo		57,44	9,09	0,0	

De la curva granulométrica obtenida con los datos anteriores, tenemos que:

Diámetro efectivo =  $D_{10} = 0,106$  mm

Diámetro del 60% =  $D_{60} = 0,52$  m.

Diámetro del 30% =  $D_{30} = 0,46$

$$\text{Coeficiente de uniformidad} = C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0,52}{0,106} = 4,9$$

Considerando que los finos encontrados corresponden a material retenido por el filtro, de la curva granulométrica tenemos los siguientes resultados.

TABLA 99. Resultados de ensayo de granulometría del lecho filtrante. Filtro F3-1.

Tamiz número	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	% retenido	% que pasa
8	2,36	1,15	0,20	99,8
10	2,00	2,04	0,36	99,4
20	0,850	88,80	15,46	84,0
40	0,425	434,50	75,65	8,3
60	0,250	8,50	1,48	6,9
100	0,150	17,10	2,98	3,9
200	0,075	22,30	3,88	0,0

Los valores de el D<sub>50</sub> y D<sub>10</sub>, se establecen encontrando la ecuación de la recta que une los puntos [log (0,85); 84,0] y [log (0,425); 8,3], obteniendo:

$$Y - 84,0 = 251,47 [X - \log (0,850)]$$

Cuando Y = 10 ----> X = - 0,36485 ----> D<sub>10</sub> = 0,432 mm

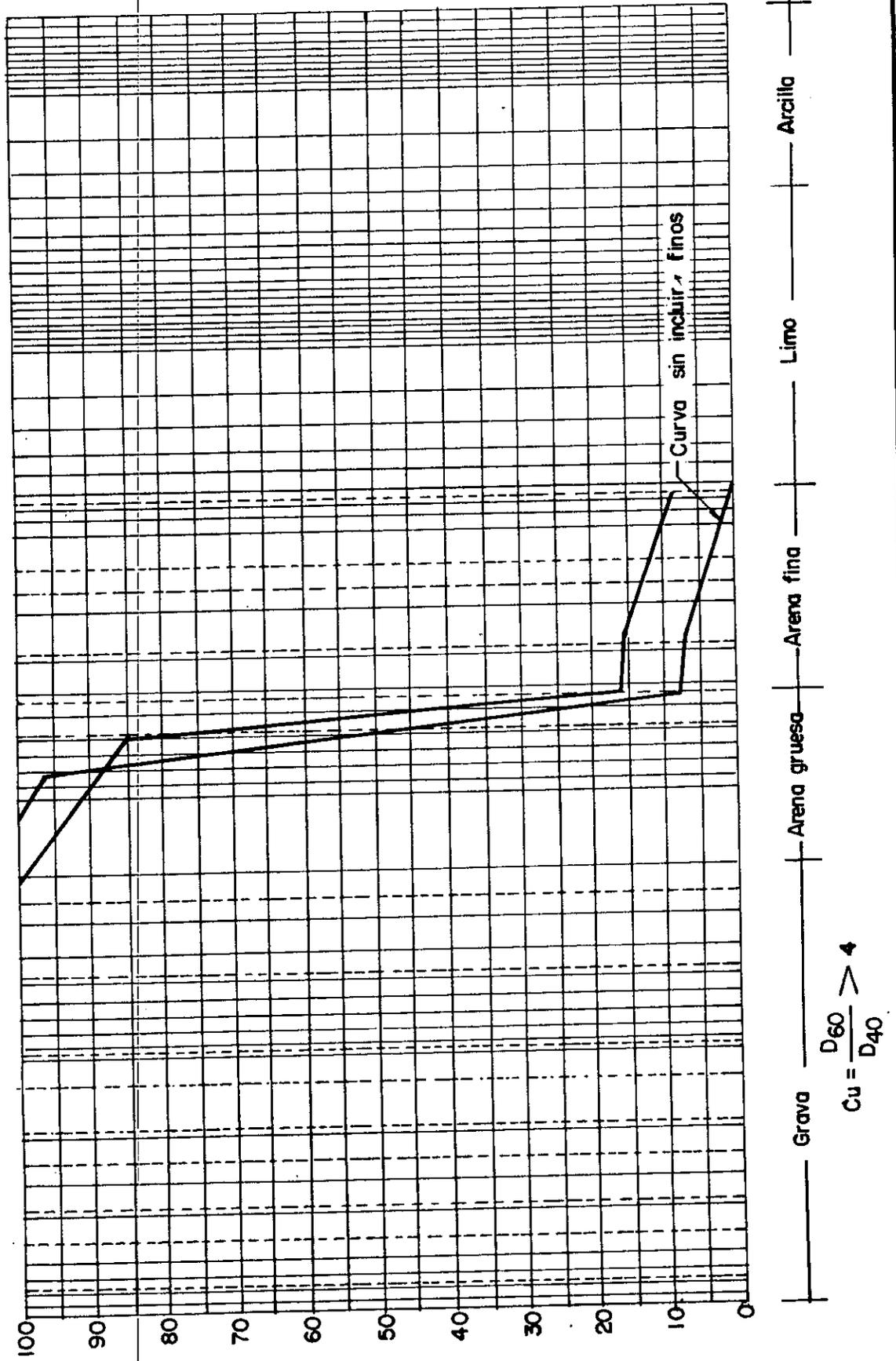
Cuando Y = 60 ----> X = - 0,16602 ----> D<sub>50</sub> = 0,682 mm

Entonces el coeficiente de uniformidad es:

$$C_u = \frac{D_{50}}{D_{10}} = \frac{0,682}{0,432} = 1,58$$

Estos valores se ajustan a los recomendados para filtros rápidos. En la Figura 90 se muestra la curva granulométrica correspondiente.

FIGURA 90. GRANULOMETRIA DEL LECHO FILTRANTE. FILTRO F3-1  
 PLANTA I. ACUEDUCTO DE CARTAGENA.



5.4.2.2 **Ensayo de bolas de barro.** Esta prueba tiene por objeto el determinar la presencia de bolas de barro en el lecho filtrante. Estas son indicio de que se esta haciendo un lavado defectuoso del filtro. Se producen al quedar atrapado barro dentro del lecho, que se compacta al poner en operación el filtro.

La prueba puede hacerse por el método volumétrico, cuando las bolas de barro se presenten consistentes. En este caso se toma una muestra de volumen aproximado, 5 litros y se lava suavemente este material por el tamiz no. 10. Las bolas de lodo retenidas, son llevadas a una probeta con determinada cantidad inicial de agua. El aumento de volumen del conjunto, es el correspondiente al de las bolas de barro. Se establece la relación porcentual entre este volumen y el de la muestra total.

En el filtro evaluado las bolas de barro no presentaban la consistencia necesaria, por lo que se hizo la prueba, conjuntamente con la granulometría del lecho filtrante. Las bolas de barro, tomadas como la fracción que pasa el tamiz 200, resultaron ser el 9,2% del peso inicial de la muestra.

$$\% \text{ B.L.} = \frac{\text{Peso de lodo} \times 100}{\text{Peso de toda la muestra}} = \frac{58,41 \times 100}{632,80} = 9,2\%$$

Este valor es muy alto, pues en un lecho filtrante, correctamente mantenido, no deben presentarse bolas de barro en una proporción tan grande. Porcentajes mayores al 5% ya indican un mal funcionamiento y la necesidad de tratar o reemplazar todo el lecho filtrante. A continuación se incluye la tabla de valores utilizada en la planta de tratamiento de Chicago y que comunmente se emplea en otras partes para evaluar los filtros según el porcentaje de bolas de barro.

**TABLA 100.** Calificación del estado de conservación de los lechos filtrantes.

Porcentaje en volumen de bolas de barro	Calificación
0,0 - 0,1	Excelente
0,1 - 0,2	Muy bueno
0,2 - 0,5	Bueno
0,5 - 1,0	Regular
1,0 - 2,5	Deficiente
2,5 - 5,0	Malo
Sobre 5,0	Muy malo

**5.4.2.3 Fugas de arena.** Las fugas de arena se presentan por lo general como consecuencia del desacomodo de la capa de grava que sirve de soporte al lecho filtrante o por roturas en el sistema de falso fondo.

En las plantas evaluadas, aunque no se pudo cuantificar, si se presentan estas fugas. Lo anterior se evidencia por la cantidad de arena de filtros que debe retirarse periódicamente de la cámara de desinfección. Esta operación se realiza aprovechando las paradas forzosas de las plantas.

**5.4.2.4 Lecho de grava.** El objeto del ensayo realizado es el determinar los movimientos que hayan ocurrido en la capa de grava. Para esto se recurre a hacer el levantamiento de las gravas por medio de sondeos con una varilla graduada de punta plana, en distintos sitios del filtro.

Los filtros de las plantas uno y dos presentan cuatro canales de recolección de agua de lavado en cada cara. Se tomaron estas canales como ejes para hacer los sondeos a ambos lados de la canal. El procedimiento regular consistió en parar la unidad a evaluar, fijar un nivel de agua como referencia, e introducir la varilla dentro del lecho de arena en los puntos indicados, hasta que hiciera contacto con el lecho de grava.

Con estas lecturas se determinaron las cotas en cm sobre un plano de referencia y se trazaron las curvas de nivel contenidas en las Figuras 91, 92 y 93.

FIGURA 91. TOPOGRAMA DEL LECHO DE GRAVAS DEL  
FILTRO F<sub>1-1</sub> . PLANTA I

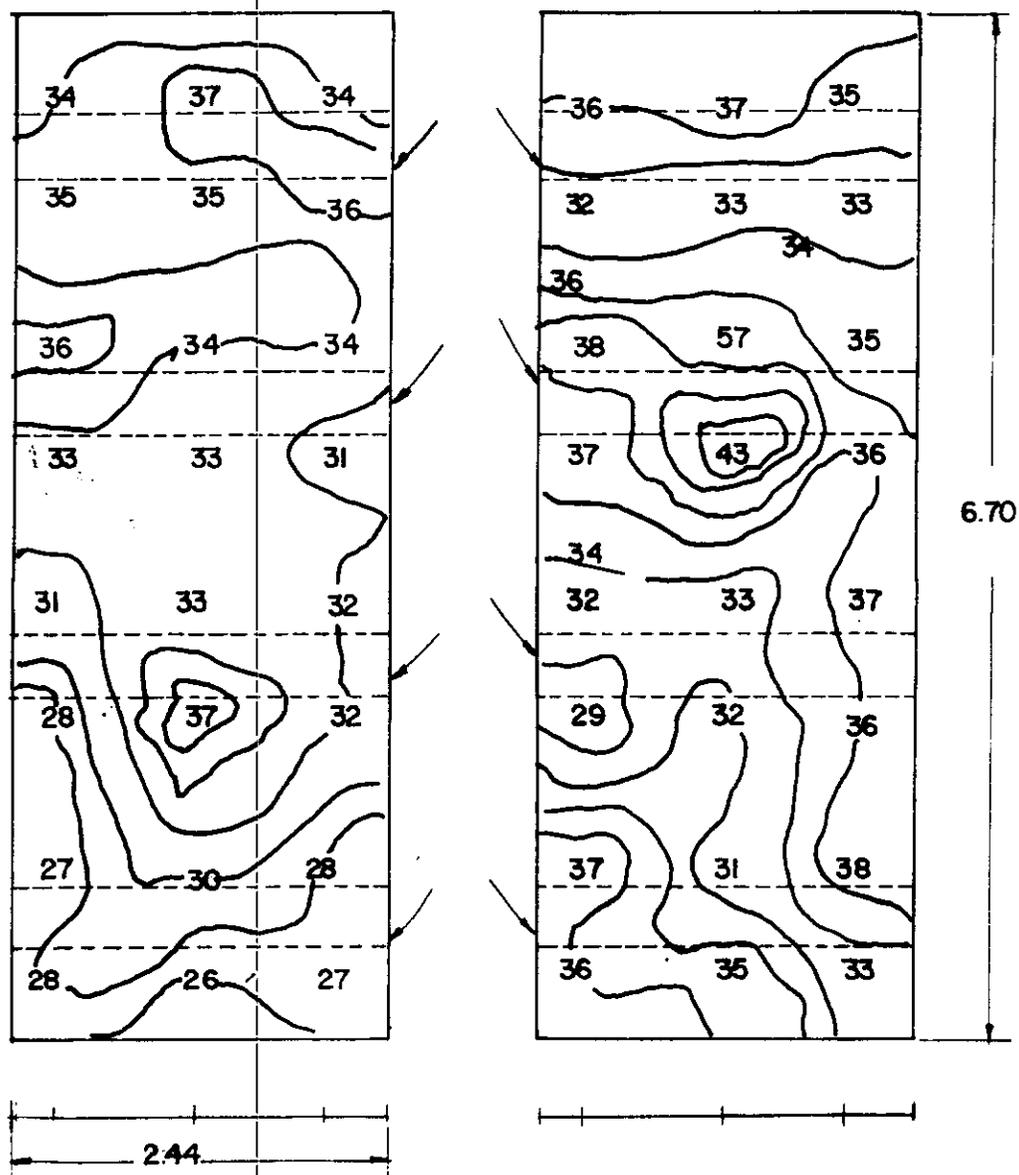


FIGURA 92. TOPOGRAMA DEL LECHO DE GRAVAS DEL FILTRO F<sub>3-1</sub>. PLANTA UNO.

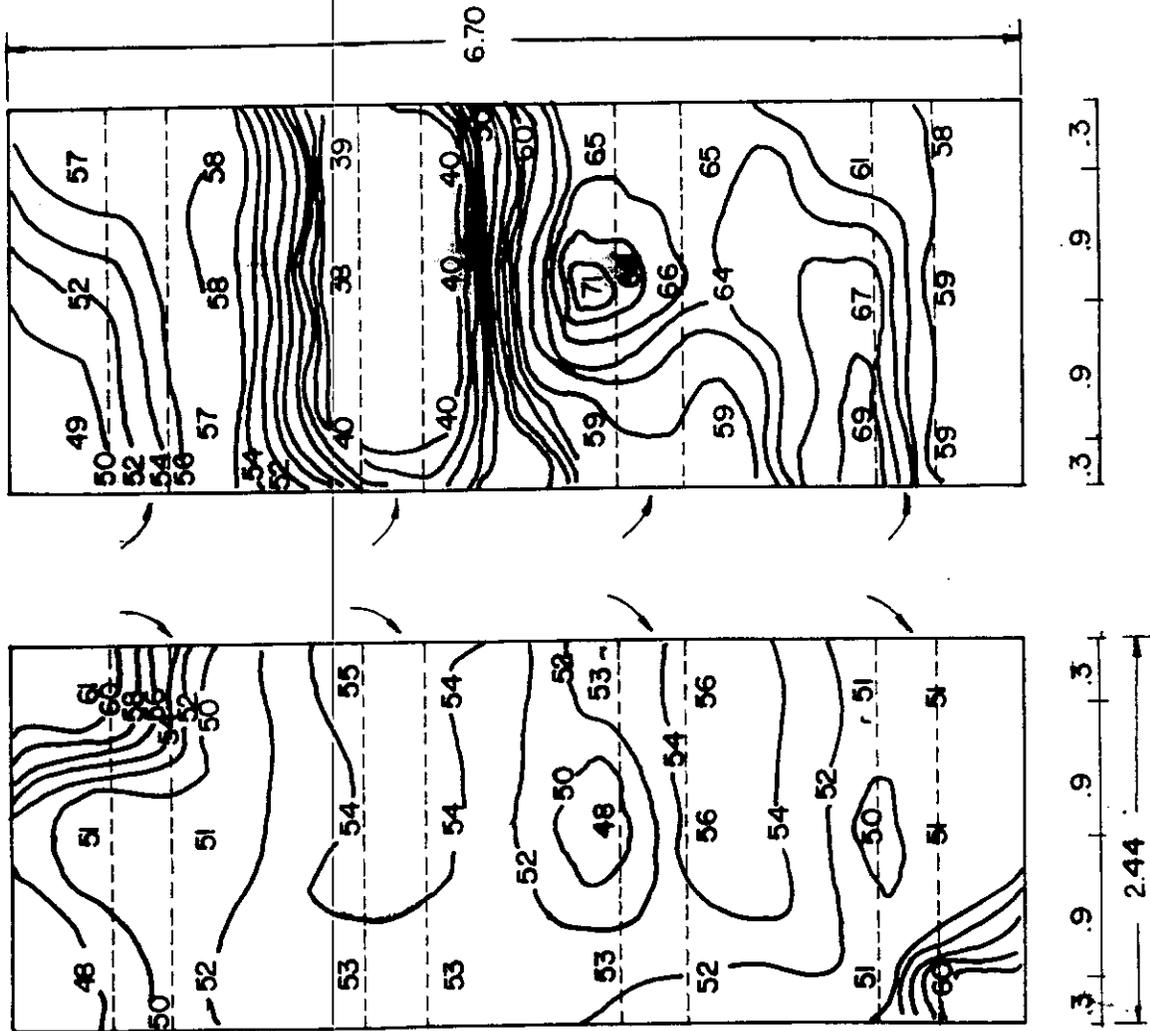
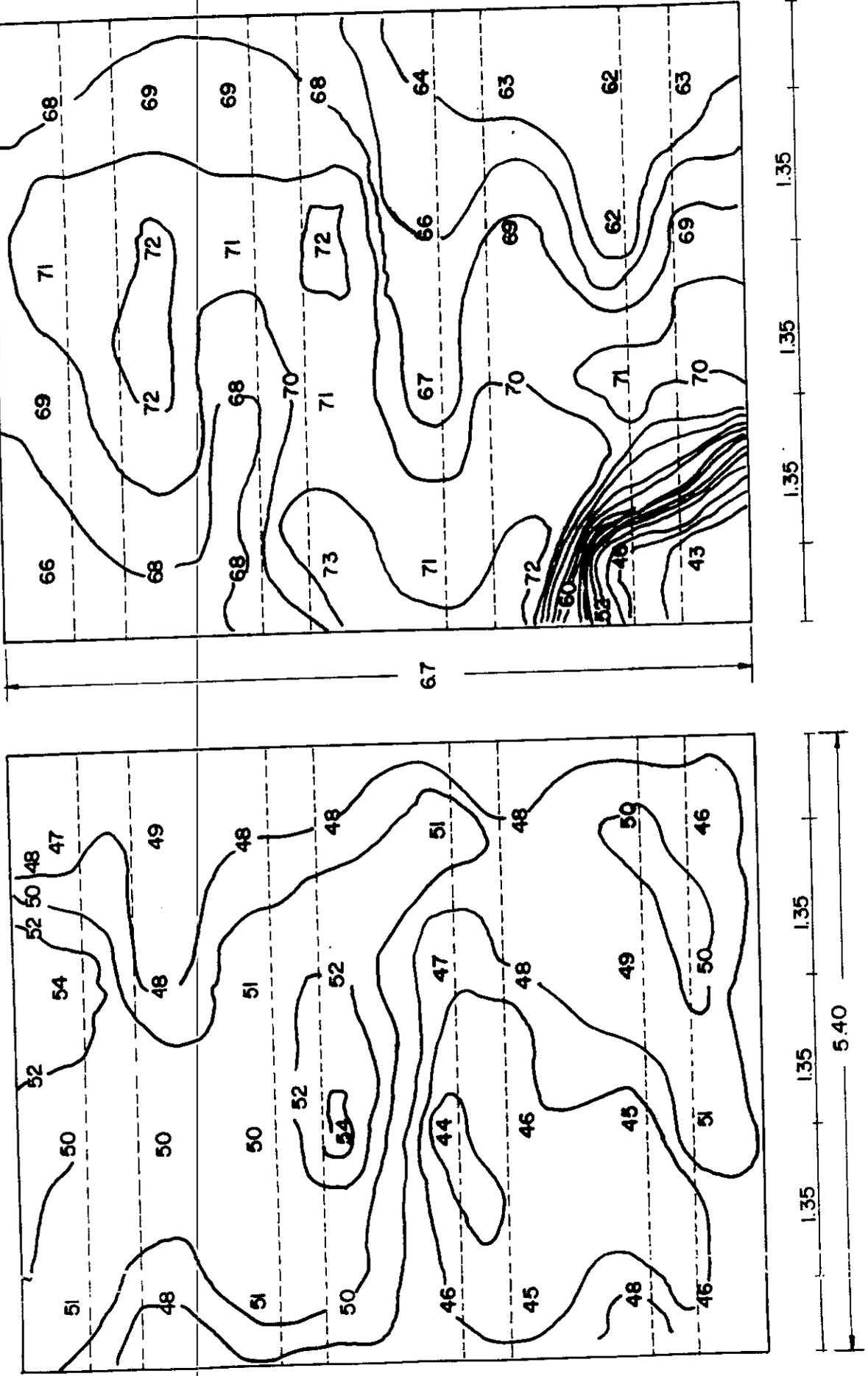


FIGURA 93. TOPOGRAMA DEL LECHO DE GRAVAS DEL FILTRO F<sub>1-2</sub>. PLANTA 2



En los filtros evaluados, se hizo evidente la irregular disposición de las gravas que conforman el lecho de soporte de estas unidades. En la bibliografía existente se nos dice que las variaciones de nivel entre las cotas más altas y las más bajas no deben ser superiores a 5 cm. Sin embargo, en la planta se han encontrado diferencias del orden de los 12 cm e incluso el filtro uno de la planta dos, presentó una discontinuidad del lecho de gravas en la parte inicial del recorrido del agua de lavado.

Este desacomodo de las gravas es debido al lavado de los filtros con chorros de velocidad ascendente muy alta, a la apertura rápida de las válvulas de agua de lavado y a que hace ya varios años no se reconstruye el lecho filtrante a estas unidades

5.4.3 Características del proceso de lavado del filtro.

El lavado del medio filtrante puede hacerse de dos formas: por flujo de agua a presión en sentido contrario al de operación y/o por lavado superficial del mismo.

En las plantas uno y dos estaban previstas las dos formas de lavado, sin embargo, el lavado superficial esta fuera de servicio desde hace varios años.

A continuación se expone una descripción del proceso de lavado, y se le caracteriza determinando las velocidades

del agua de lavado, la duración de esta operación, las turbiedades del efluente del lavado del filtro y la expansión del lecho filtrante.

5.4.3.1 El lavado del filtro. El lavado en contracorriente es en este caso por flujo ascendente. La operación normal del lavado es el siguiente:

Se cierran las válvulas del afluente y efluente al filtro, esperando un momento entre las dos maniobras, para que baje un poco el nivel del agua en el filtro. A continuación se abre lentamente la válvula de agua de lavado de fondo. Acto seguido, debe abrirse la válvula del desagüe. El nivel empezará a subir y a derramar el agua sucia por las canaletas. Si el lavado es hecho en uno de los filtros de la planta uno, se lavan las dos caras del filtro simultáneamente, mientras que en la planta dos, deberá hacerse por separado.

Cuando se abre la válvula de lavado ascendente, la expansión del lecho filtrante se inicia en la parte superior y luego progresa hacia abajo. Al estar la válvula completamente abierta, la superficie de arena alcanzará su altura máxima.

Al inicio del lavado, los granos de arena no se separan

unos de otros rápidamente a través del lecho, ya que se requiere de algún tiempo para que la arena se equilibre a esa distancia expansionada en el flujo ascendente del agua de lavado. Si el lavado se inicia repentinamente, el lecho de arena se eleva por encima de la grava, formando un vacío entre la arena y esta última. A continuación el lecho de arena se resquebraja en uno o más puntos dando origen a protuberancias en la superficie de arena y el desbaratamiento de las capas de grava subyacentes. Este fenómeno exige una reconstrucción frecuente del lecho de grava.

La duración de la operación de lavado es controlada visualmente por el operador, en función del grado de turbidez presentada por el agua que escurre por las canaletas. Cuando esta ya es bastante clara, cierra la válvula de lavado ascendente y procede a lavar la otra cara del filtro si la operación es en la planta dos. Al no poderse hacer el lavado superficial, se abren las válvulas de afluente y efluente del filtro.

Entre los errores que pueden cometerse durante el lavado del filtro, el más grave consiste en iniciar el lavado ascendente rápidamente cuando el lecho ya ha sido drenado, ya que ello provoca una considerable perturbación de la grava y podría ocasionar la ruptura del sistema de drenaje

inferior del filtro debido al efecto de golpe de ariete.

La acción de chorro. El flujo ascendente que se origina en la grava durante el lavado nunca es completamente uniforme, y en consecuencia en algunas partes del lecho de arena expandido el agua y la arena se desplazan hacia arriba a velocidades superiores a la media del lavado ascendente mientras que en otros puntos la arena se desplaza hacia abajo. La acción de los chorros es un fenómeno natural que se presenta siempre que el agua fluye hacia arriba a través de un material poroso a una velocidad que contribuye en parte a suspender el material, y se produce siempre que las partículas finas están encima de las más gruesas, y la velocidad ascendente del agua expande parcialmente al material fino, pero no al grueso. El tamaño y peso específico del material solo afecta a la velocidad y tamaño de los chorros, pero no a su incidencia.

Si a través de un lecho de grava se registra un flujo ascendente con velocidades de lavado superiores a  $61 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$  aquel no desplazará a ninguna de las partículas de grava a menos que esta se encuentre debajo de una capa de arena, ya que la presencia de este último material aumenta considerablemente la movilidad de la grava.

La pérdida de carga que se registra a través del lecho de arena expansionado de 60 cm es aproximadamente del orden de 0,6 m lo que corresponde al peso del medio una vez restado el del agua que desplaza. La presión debajo de la arena tendrá la energía suficiente para provocar velocidades de flujo localizadas de 3 m/s ( 300 veces mayor que la media de lavado) lo que puede ocasionar trastornos en el filtro.

En régimen normal, la velocidad ascendente media del agua a través de la grava debería ser menor de 0,03 m/s. Las velocidades de los chorros llegan a ser una diez veces mayores que la velocidad media ascendente a través de la zona ocupada por la arena.

En un chorro de arena esta es aproximadamente del 10 al 15 % del volumen total de arena y agua. En aquellos puntos en que la arena esta cayendo ocupa aproximadamente el 30% del volumen. La diferencia de densidad resultante entre estas dos mezclas adyacentes proporciona la fuerza necesaria para mantener la rápida velocidad que se registra en el chorro.

Los chorros provocan el desplazamiento lateral de la grava, que es mucho mayor cuando las velocidades son mayores de  $37 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ .

En algunos casos la formación de chorros se estimula por la distribución desigual del agua de lavado, ya que tienden a formarse en las zonas en que estas son más altas. Cuando esto ocurre el desplazamiento de la grava permite que la arena pase hacia abajo hasta los drenajes inferiores, atascandolos de tal modo que el área que originalmente tenían una velocidad de lavado alto se convierta en una de flujo lento.

Los problemas de común ocurrencia como consecuencia de un deficiente lavado son:

- La formación de bolas de barro.
- La compactación del lecho durante la filtración.
- La separación de los lechos de las paredes laterales.
- La creación de zonas atascadas.

5.4.3.2 Velocidad y caudal de filtración antes del lavado. El procedimiento seguido fué el siguiente: Seleccionada la unidad a evaluar, se cerró la válvula del afluente y se dejó bajar el nivel del agua en el filtro hasta debajo de las canaletas de desagüe del agua de lavado.

Sobre una regla previamente instalada en la pared del filtro se cronometró el tiempo que tomaba el nivel del agua en descender 5 cm. Estos valores y los cálculos

correspondientes de velocidad se detallan a continuación para las unidades evaluadas, los filtros F2-1, Fe-1, F1-2 y F5-1. En los filtros de la planta uno se referencian lecturas sobre una sola de sus caras pues la diferencia encontrada es poco significativa.

## F2-1

Horas de operación: 32      Area de filtración = 32,70 m<sup>2</sup>

H (cm)	T (s)
5	44
5	46
5	49
5	51
5	54

Tiempo promedio = 50 s

Velocidad de filtración:

$$V_f = \frac{0,05}{50} = 0,001 \text{ m/s}$$

Rata de filtración = 86,4 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día

Caudal filtrado = 2.825,0 m<sup>3</sup>/día

## Fe-1

Horas de operación: 37      Area de filtración = 32,70 m<sup>2</sup>

H (cm)	T (s)
5	32
5	37
5	36
5	40
5	42
5	43

Tiempo promedio = 38,3 s

Velocidad de filtración

$$V_f = \frac{0,05}{38,30} = 0,00131 \text{ m/s}$$

Rata de filtración = 112,8 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día

Caudal filtrado = 3.688,4 m<sup>3</sup>/día

F1-2

Horas de operación: 23      Area lecho filtrante = 36,20 m<sup>2</sup>

Cara izquierda:

Tiempo promedio = 127,3 seg

Velocidad de filtración       $V = \frac{0,05}{127,30} = 0,00039 \text{ m/s}$ Rata de filtración = 33,9 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/díaCaudal de filtración = 1.227,6 m<sup>3</sup>/día

Cara derecha:

Tiempo promedio = 55,7 s

Velocidad de filtración       $V = \frac{0,05}{55,70} = 0,00090 \text{ m/s}$ Rata de filtración = 77,6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/díaCaudal de filtración = 2.807,6 m<sup>3</sup>/díaCaudal total del filtro = 4.035,2 m<sup>3</sup>/díaRata de filtración = 55,7 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día

Aporte de cada cara del filtro en el total de filtrado:

Cara izquierda: 30%      Cara derecha : 70%

Es muy marcada la diferencia entre el comportamiento de las caras del filtro.

F5-1

Horas de operación : 18      Area de filtración = 32,70 m<sup>2</sup>

- Nivel por encima de la canaleta.

Descenso del nivel y tiempo : 5 cm en 21 s

$$\text{Velocidad de descenso} = \frac{0,05}{21,00} = 0,002381 \text{ m/s}$$

Velocidad de filtración

$$V_f = \frac{39,46 \times 0,002381}{32,70} = 0,002873 \text{ m/s}$$

$$\text{Caudal de filtración} = 8.113,0 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$$

$$\text{Rata de filtración} = 240,0 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$$

- Nivel por debajo de la canaleta

H (cm)	T (s)
5	17
5	18
5	20

$$\text{Tiempo promedio} = 18,8 \text{ s}$$

Velocidad de filtración

$$V_f = \frac{0,05}{18,80} = 0,00266 \text{ m/s}$$

$$\text{Rata de filtración} = 230,0 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$$

$$\text{Caudal filtrado} = 7.518,6 \text{ m}^3/\text{día}$$

Las tasas de filtración para carreras de operación de más de 32 horas resultan bastante bajas. No obstante, por la carencia de los medidores de caudal, no fué posible establecer la conveniencia o no de acortar estas carreras de filtración, buscando la mayor producción de agua.

**5.4.3.3 Velocidad y caudal de lavado del filtro.** El objeto de este ensayo es determinar la velocidad del flujo ascendente con que se hace el lavado del medio filtrante, y estimar el volumen de agua gastado para esta maniobra. También debería permitir chequear la precisión del

controlador de caudal de agua de lavado, pero en ausencia de este medidor, no se pudo hacer.

Para determinar la velocidad del agua de lavado, se dispuso una regla graduada dentro del filtro y se tomo el tiempo en que subió el nivel del agua una altura de 10 cm, al abrir la válvula para iniciar el lavado del filtro.

Con esta velocidad y cronometrado el tiempo del lavado, se establece el caudal y volumen empleados en el mismo.

Para el filtro F2-1:

Duración del lavado : 5,5 minutos  $\equiv$  330 s

Area del lecho filtrante : 32,70 m<sup>2</sup>

Velocidad de lavado:

$$V = \frac{0,10 \text{ m}}{14 \text{ s}} = 0,7143 \text{ cm/s} \equiv 0,4285 \text{ m/min} \equiv 25,7 \text{ m/h}$$

Caudal de lavado:  $Q = V.A = 0,234 \text{ m}^3/\text{s} \equiv 14 \text{ m}^3/\text{min}$

Volumen de agua empleado:  $\text{Vol.} = Q.t = 77 \text{ m}^3.$

Para el filtro Fe-1:

Duración del lavado : 8,5 minutos  $\equiv$  510 s

Area del lecho filtrante : 32,70 m<sup>2</sup>

Velocidad de lavado:

$$V = \frac{0,10 \text{ m}}{12 \text{ s}} = 0,8333 \text{ cm/s} \equiv 0,50 \text{ m/min} \equiv 30,0 \text{ m/h}$$

Caudal de lavado:  $Q = V.A = 0,273 \text{ m}^3/\text{s} \cong 16,35 \text{ m}^3/\text{min}$

Volumen de agua empleado:  $\text{Vol.} = Q.t = 139 \text{ m}^3$ .

Para el filtro F1-2:

- Cara izquierda.

Duración del lavado : 5,0 minutos  $\cong 300 \text{ s}$

Area del lecho filtrante :  $36,20 \text{ m}^2$

Velocidad de lavado:

$$V = \frac{0,30 \text{ m}}{45 \text{ s}} = 0,6667 \text{ cm/s} \cong 0,40 \text{ m/min} \cong 24 \text{ m/h}$$

Caudal de lavado:  $Q = V.A = 0,2413 \text{ m}^3/\text{s} \cong 14,48 \text{ m}^3/\text{min}$

Volumen de agua empleado:  $\text{Vol.} = Q.t = 72,4 \text{ m}^3$ .

- Cara derecha.

Duración del lavado : 6,5 minutos  $\cong 390 \text{ s}$

Area del lecho filtrante :  $36,20 \text{ m}^2$

Velocidad de lavado:

$$V = \frac{0,10 \text{ m}}{20 \text{ s}} = 0,50 \text{ cm/s} \cong 0,30 \text{ m/min} \cong 18,0 \text{ m/h}$$

Caudal de lavado:  $Q = V.A = 0,181 \text{ m}^3/\text{s} \cong 10,86 \text{ m}^3/\text{min}$

Volumen de agua empleado:  $\text{Vol.} = Q.t = 70,6 \text{ m}^3$ .

La acción del lecho filtrante cuando es expandido es gobernada por los granos de mayor tamaño, por lo que se expresa mejor como una función de su tamaño  $D_{50}$ . La expansión de un lecho filtrante granular durante el lavado puede calcularse así:

La velocidad a la que comienza la expansión del lecho es:

$$V_b = \frac{0,382 (D_{50})^{1,82} (\Gamma(\Gamma_a - \Gamma))^{0,94}}{\mu^{0,88}}$$

en donde

- $V_b$  es la velocidad de contralavado en m/min
- $D_{50}$  es el producto del tamaño efectivo por el coeficiente de uniformidad en mm.
- $\Gamma_a$  es la densidad del medio filtrante
- $\Gamma$  es la densidad del agua
- $\mu$  es la viscosidad del agua en centipoises.

Para la mayoría de las suspensiones, el caudal de lavado debe ser superior a 0,30 m/min, pero inferior a 10 $D_{50}$  m/min para arena y que 4,7 $D_{50}$  m/min para antracita. Al límite superior se le denomina velocidad terminal,  $V_t$ .

Así, considerando inicialmente el medio filtrante como constituido por sólo arena, para los filtros de las plantas uno y dos, los valores de  $V_b$  y  $V_t$ , serán:

Velocidad de fluidificación, para  $T = 30^\circ C$

$$V_b = \frac{0,382 (D_{50})^{1,82} (\Gamma(\Gamma_a - \Gamma))^{0,94}}{\mu^{0,88}}$$

$$V_b = \frac{0,382 (0,682)^{1,82} (0,99576(2,65 - 0,99576))^{0,94}}{(0,801)^{0,88}}$$

$$V_b = 0,293 \text{ m/min}$$

Velocidad terminal,

$$V_t = 10 \cdot D_{50} = 10 \cdot (0,682) = 6,82 \text{ m/min}$$

Lo que significa que la velocidad de lavado de 6,82 m/min arrastrará el material filtrante del lecho y una de 0,29 m/min originará la fluidificación del lecho pero no su expansión.

Ahora considerando la capa de antracita, de  $D_{10} = 0,75 \text{ mm}$ , y  $C_u = 1,7$ , obtenemos los siguientes valores:

Velocidad de fluidificación, para  $T = 30^\circ\text{C}$

$$V_b = \frac{0,382 (D_{50})^{1,82} (\Gamma(\Gamma_s - \Gamma))^{0,94}}{\mu^{0,88}}$$

$$D_{50} = C_u \times D_{10} = 1,7 \times 0,75 \text{ mm} = 1,275 \text{ mm}$$

$$V_b = \frac{0,382 (1,275)^{1,82} (0,99576(1,50 - 0,99576))^{0,94}}{(0,801)^{0,88}}$$

$$V_b = 0,364 \text{ m/min}$$

Velocidad terminal,

$$V_t = 10 \cdot D_{50} = 10 \cdot (1,275) = 12,75 \text{ m/min}$$

Los valores hallados para el lecho de antracita serán los que delimitan el rango de velocidades de lavado a usar.

El lavado de un lecho granular durante la operación de lavado a contracorriente es el resultado del esfuerzo

cortante producido por el agua ascendente y la abrasión producida por los contactos entre partículas dentro del lecho fluidificado. Según demostró el investigador Kawamura, la máxima abrasión se produce cuando la expansión del lecho es del 10%, es decir cuando  $V_b = 0,1V_t$ . Esto para temperaturas de 20°C.

Entonces la velocidad deseable para el lavado en las plantas uno y dos, será:

$$V_b = 0,1 \times V_t = 0,1 \times 6,82 \text{ m/min} = 0,682 \text{ m/min}$$

Al revisar nuevamente las velocidades de lavado encontradas en la planta, se observa que estas son inferiores a la deseable para un buen lavado, pues apenas estan produciendo la fluidificación del lecho filtrante. Lo anterior descarta en parte, que la pérdida del material filtrante que se da en estos filtros, sea a consecuencia de una excesiva velocidad de lavado. La causa será una combinación de efectos de la oclusión de aire en el filtro, la apertura rápida de la válvula de agua de lavado y la formación de zonas atascadas.

**5.4.3.4 Velocidad y caudal después del lavado.** En igual forma a como se procedió al calcular la velocidad de filtración antes del lavado, se determinó la velocidad del filtrado después del lavado.



Area del lecho filtrante: 36,2 m<sup>2</sup> por cara.

Cara izquierda

H (cm)	T (s)
5	11
5	13
5	12
5	13
5	14
5	12
5	15

Tiempo promedio = 12,9 s

Velocidad de filtración

$$V_f = \frac{0,05}{12,90} = 0,003836 \text{ m/s}$$

Rata de filtración = 334,9 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día

Caudal filtrado = 12.122,8 m<sup>3</sup>/día

Cara derecha:

H (cm)	T (s)
5	14
5	12
5	13
5	16
5	15
5	13
5	14

Tiempo promedio = 13,9 s

Velocidad de filtración

$$V_f = \frac{0,05}{13,90} = 0,003597 \text{ m/s}$$

Rata de filtración = 310,8 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día

Caudal filtrado = 11.250,6 m<sup>3</sup>/día

Caudal total inicial del filtro F3-2 = 23.373 m<sup>3</sup>/día

Rata de filtración = 322,8 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día

Aporte porcentual del caudal por cada cara:

Izquierda : 52%      Derecha : 48%

F5-1

Duración del lavado = 6 min

Area filtrante = 32,70 m<sup>2</sup>

H (cm)	T (s)
5	13
5	14
5	16
5	13
5	14

Tiempo promedio = 14,17 s

Velocidad de filtración

$$V_f = \frac{0,05}{14,17} = 0,003529 \text{ m/s}$$

Rata de filtración = 304,9 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/díaCaudal filtrado = 9.969,2 m<sup>3</sup>/día

En promedio, la velocidad de filtración en las primeras horas de la carrera, es de 300 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día.

**5.4.3.5 Expansión del lecho filtrante.** Esta práctica tiene por objeto determinar el porcentaje de aumento de espesor del lecho filtrante durante la operación de lavado del filtro.

Para esto se utilizó un tubo metálico que tiene soldadas una serie de copas dispuestas boca arriba e igualmente espaciadas. Este instrumento se coloca sobre la superficie de la arena antes de iniciar el lavado y durante este último quedará apoyado sobre la grava. Finalizada la operación se saca el aparato y se determina la altura hasta la última copa que contiene material filtrante.

Luego se repite en otros puntos dentro del filtro y se registran las lecturas correspondientes.

Terminado el lavado se establece el espesor del lecho filtrante no expandido en los puntos donde se tomaron las lecturas anteriores. El porcentaje de expansión será entonces:

$$\% \text{ expansión} = \frac{\delta h \times 100}{h}$$

Los resultados para los filtros evaluados se muestran en la Tabla 101.

**TABLA 101** Expansión del lecho filtrante durante el lavado.

FILTRO No.	$\delta h$ (m)	h (m)	% DE EXPANSION DEL LECHO FILTRANTE
F <sub>1-1</sub>	0,25	0,48	52,1
F <sub>2-1</sub>	0,28	0,40	70,0
F <sub>5-1</sub>	0,20	0,55	36,4
F <sub>1-2</sub>	0,18	0,46	39,1

Los porcentajes de expansión encontrados resultan bastante altos, pues la práctica es procura valores entre el 15 y el 25% de expansión. Además, como se vió en el numeral anterior, la máxima abrasión entre las partículas del lecho fluidificadas y por ende el mejor lavado del mismo ocurre para valores cercanos al 10% de la expansión del lecho.

Nuevamente se pone de manifiesto, la inclusión de aire dentro del filtro, que ha provocando la pérdida del material filtrante por efecto de la violenta agitación que este ocasiona al iniciarse el lavado. Nótese que el espesor nominal del lecho filtrante es de 70 cm, compuesto de 30 cm de arena y 40 cm de antracita. Sin embargo al hacer el sondeo correspondiente, se encontraron espesores del lecho de sólo 40 cm.

**5.4.3.6 Duración de la operación de lavado.** El objetivo de esta prueba es conocer la forma como varía la turbiedad del agua durante la operación de lavado del filtro para determinar el tiempo óptimo en que esta debe hacerse.

La turbiedad del agua que se produce durante el lavado se incrementa rápidamente al inicio y luego va disminuyendo hasta obtener un valor que tiende a ser constante, por lo general inferior a las 10 U.N.T. El tiempo óptimo de lavado será el que se necesita para llegar a este valor. No resulta práctico extender el lavado por más tiempo pues se ha encontrado que la turbiedad del agua que queda en el filtro, cuando se suspende el lavado ascensional, no guarda relación directa con la calidad del efluente que se obtiene al iniciar el proceso de filtración.

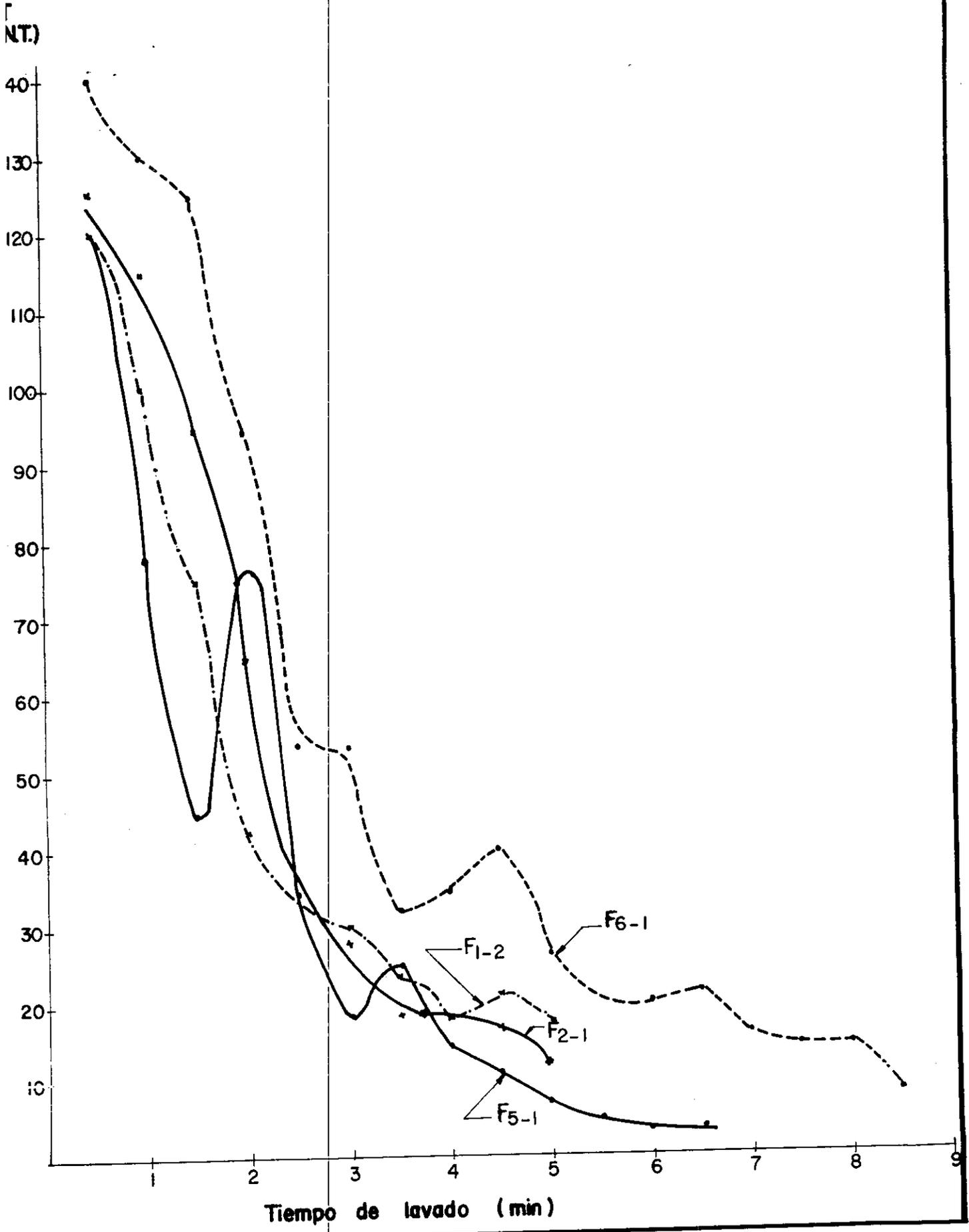
Las turbiedades determinadas se muestran en la Tabla 102 y se representan en la Figura 94, para las unidades evaluadas.

**TABLA 102.** Turbiedades del agua de lavado de filtros.

Número orden	Tiempo min	Turbiedades del agua de lavado (U.N.T.)			
		F2-1	F5-1	F8-1	F1-2
1	0,5	120,0	125,0	140,0	120,0
2	1,0	115,0	78,0	130,0	100,0
3	1,5	94,0	45,0	125,0	75,0
4	2,0	77,0	65,0	94,0	42,0
5	2,5	34,0	35,0	53,0	33,0
6	3,0	28,0	18,0	53,0	30,0
7	3,5	18,0	25,0	32,0	23,0
8	4,0	18,0	14,0	34,0	18,0
9	4,5	16,0	11,0	40,0	21,0
10	5,0	15,0	6,3	26,0	17,0
11	5,5	12,0	4,3	20,0	
12	6,0		3,7	19,0	
13	6,5		3,0	21,0	
14	7,0			15,0	
15	7,5			14,0	
16	8,0			14,0	
17	8,5			8,0	
18	9,0				

Es de esperar que cada unidad de filtración presente una curva diferente, según el estado en que se encuentra el medio filtrante. Así encontramos que la duración óptima del lavado ascensional en los filtros F2-1 y F8-1 es de 6 minutos y 9 minutos respectivamente siendo filtros iguales.

FIGURA 94. TURBIDADES DEL AGUA DE LAVADO.



## 5.5 EVALUACION DE LA DESINFECCION

La desinfección es un proceso selectivo que se ha empleado para destruir e inactivar a los organismos patógenos, particularmente las bacterias de origen intestinal.

Tales organismos son capaces de sobrevivir varias semanas a temperaturas cercanas a los 21°C y aún más a temperaturas inferiores. Además de la temperatura, su sobrevivencia en el agua depende de factores ambientales, morfológicos y fisiológicos, tales como el pH, oxígeno y nutrientes, dilución, competición con otros organismos, resistencia e influencias tóxicas y su habilidad de formar esporas.

En el agua se pueden considerar tres categorías de organismos: virus, bacterias y quistes de amebas.

Los virus, tales como los que causan la parálisis infantil y la hepatitis infecciosa, son muy resistentes a la acción de ciertos desinfectantes, como ocurre con el cloro.

Las bacterias patógenas, responsables por la transmisión de enfermedades a través del agua, son por lo general menos resistentes a la desinfección que la *Escherichia*

coli, por lo que este organismo es un buen indicador del proceso de desinfección.

Los quistes de Entamoeba histolítica son también muy resistentes y no son por lo general destruidos por la desinfección con cloro.

Los desinfectantes ha utilizar en una planta de tratamiento de aguas han de tener entre otras, las siguientes cualidades:

- Ser capaces de destruir los organismos patógenos a ser eliminados, en un tiempo razonable.
- No ser tóxicos a personas o animales, ni producir olores ni sabores al agua.
- Debe ser fácilmente medible su concentración en el agua.
- Deben quedar residuales del desinfectante en el agua, que garanticen una protección contra posibles contaminaciones posteriores en las redes de distribución.

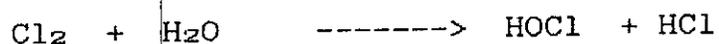
Entre los múltiples desinfectantes hoy disponible para el tratamiento de aguas, el cloro ha mostrado ser el de más conveniente uso, por su gran poder bactericida, sus menores costos, así como la facilidad de su utilización y control.

El cloro es un agente químico de la desinfección, y entre estos, se le clasifica con el bromo y el yodo, como halógenos. Es un poderoso desinfectante que tiene capacidad de penetrar en las células y de combinarse con las sustancias celulares vitales, provocando la muerte de los microorganismos.

Su acción bactericida puede explicarse así:

El cloro al combinarse con el agua y las impurezas presentes en esta, forman varios compuestos. Algunos de gran poder bactericida, otros son desinfectantes más débiles y otros son inactivos. La proporción en que se producen estos compuestos depende de la naturaleza de las impurezas y del pH del agua.

El cloro gaseoso disuelto en agua pura, reacciona en forma completa para formar ácido hipocloroso (HOCl).



Y este ácido se disocia en:  $\text{HOCl} \text{ -----} \rightarrow \text{OCl}^- + \text{H}^+$ , dependiendo de la disociación del pH del agua. Ambos compuestos son desinfectantes, pero lo es mucho más el ácido hipocloroso. La incidencia del pH es evidente si se considera que a un pH 5, resulta sólo ácido hipocloroso y a un pH 9, resulta cerca del 4% de HOCl y 96% de OCl<sup>-</sup>.

Cuando la acción del cloro es sobre agua con impurezas, la materia orgánica y la amonía contenidas, provocan reacciones secundarias que bien conducen a la formación de cloruros inactivos, o a la formación de cloraminas. Estas últimas pueden ser: monocloraminas ( $\text{NH}_2\text{Cl}$ ), dicloraminas ( $\text{NHCl}_2$ ) y en cantidades no considerables, cloraminas complejas.

Las cloraminas importantes para la desinfección tienen su formación condicionada también al pH. Con valores de pH por encima de 8,5, solamente se formarán monocloraminas. A un pH de 7,0, aparecen monocloraminas y dicloraminas en igual proporción. Y a pH entre 4,4 y 5,0, únicamente dicloraminas.

Los residuales combinados de cloro están sujetos al fenómeno de la hidrólisis, produciendo mayor o menor cantidad de ácido hipocloroso. Las monocloraminas presentan una constante de hidrólisis muy baja, formando cantidades muy pequeñas de ácido hipocloroso, mientras que las dicloraminas producen mayor cantidad de este ácido, y de ahí su mayor eficiencia como bactericida.

Las cloraminas como desinfectantes difieren del ácido hipocloroso, en que a pesar de ser su poder desinfectante menor, los residuales producidos son mucho más estables.

De ahí que deba establecerse el tipo de residual obtenido para una determinada cloración. Este puede ser "residual de cloro libre disponible" o "residual de cloro combinado disponible".

En el residual de cloro combinado disponible, el cloro presente está combinado con amonia u otro compuesto de nitrógeno, y esta disponible para destruir organismos.

En el residual de cloro libre disponible, el cloro presente esta bajo la forma de HOCl o de OCl<sup>-</sup>.

El contenido de cloro residual es función del cloro dosado, de la relación entre el cloro dosado y el nitrógeno amoniacal presente, del pH y del tiempo de la reacción.

Dado que la determinación del residual de cloro disponible en el agua es el principal control al proceso de desinfección, al querer evaluarlo es preciso seguir los siguientes pasos: 1) determinar la concentración y tiempo de contacto que produce los residuales deseados, 2) analizar la curva de demanda de cloro del agua en proceso, 3) inspeccionar los mecanismos y obras para aplicación del cloro, 4) revisar la información existente en los archivos de la planta para observar su comportamiento en el tiempo.

5.5.1 Concentración y tiempo de contacto del cloro. Es de esperar que a mayor concentración del cloro en la solución aplicada, se requiera un menor tiempo de contacto para que este logre sus objetivos. En las plantas de tratamiento uno y dos, la desinfección se hace en una única cámara, localizada en la planta uno. Esta tiene por dimensiones aproximadas, 6,2 m x 18,0 m y la altura promedio del agua en la misma es de 2,0 m, operando las dos plantas conjuntamente para un caudal de 55.000 m<sup>3</sup>/día. Así el volumen de la cámara resulta en 223,2 m<sup>3</sup>, y el tiempo de retención de la misma,  $T = V/Q = (223,2/55.000) \times 1.440 = 5,85$  minutos.

A este tiempo debería sumarse, en condiciones de operación normal, el período de contacto que tiene lugar en los tanques de almacenamiento, antes de su despacho hacia la ciudad. Estos tanques tienen por volumen 9.000 y 8.000 m<sup>3</sup>. La determinación del tiempo de retención de los mismos ha de hacerse con un ensayo de trazadores que resulta bastante complejo por la magnitud de los volúmenes de agua implicados. Teóricamente también resulta de difícil estimación pues el tanque uno recibe además parte del agua tratada por la planta tres y no están instalados los elementos pitométricos necesarios para cuantificar estos caudales.

Dado que la disposición de las válvulas instaladas permiten la salida del agua hacia la ciudad, sin pasar por los tanques antes mencionados, es necesario que el tiempo de contacto requerido para el proceso de desinfección se obtenga en la cámara de cloración.

En las condiciones encontradas, con un tiempo de retención tan bajo, es posible que se este incurriendo en costos mayores, pues con tiempos cortos de contacto se requiere una mayor dosificación de cloro.

5.5.2 Curva de demanda de cloro. La dosis de cloro a aplicar es función del contenido microbiano y de bacterias del agua, el pH, el contenido de nitrógeno, la temperatura, la concentración en que se aplique el cloro y el tiempo de contacto del mismo. En el laboratorio, al igual que se hace para determinar la dosis de coagulante, es posible determinar que cantidad de cloro necesita un volumen conocido de agua para ser desinfectada.

Esta prueba se denomina demanda de cloro, y permite la estimación aproximada de la cantidad del mismo que se requiere para producir determinado cloro residual en fuentes de agua de calidad potable con poca polución.

El procedimiento seguido fue el siguiente:

1. Con una probeta graduada se midieron 500 ml de muestra para cada uno de los 10 frascos de ensayo, los cuales fueron aislados para que no les penetrara la luz.
2. A partir de una solución madre de cloro, de concentración conocida, se preparó una solución diluida para hacer la dosificación de cloro a cada una de las muestras. Esta tenía una concentración de 630 ppm de cloro. Así cada milímetro aplicado a una muestra de 500 ml, representaba una dosis de 1,26 mg/l.
3. Lista la solución diluida para dosificar, se procedió a aplicarla a cada una de las muestras en la cantidad apropiada para cubrir un rango de dosis aplicada hasta de 5,0 mg/l, considerando las experiencias tenidas en la planta.
4. Se mezclaron los contenidos de los frascos y se dejaron en reposo a temperatura controlada, y en la oscuridad.
5. Se seleccionó un período de contacto inicial. Al final del mismo se procedió a determinar el residual de cloro disponible total por el método de la ortotolidina. Para este efecto se vierten 5 ml del reactivo de ortotolidina a un tubo Nessler de 100 ml. Se agregan 95 ml de la muestra, se cubre el tubo con un tapon de caucho y

se agita vigorosamente. Luego se compara el color amarillo que se desarrolla con los patrones permanentes de color, previamente preparados con solución de cromato dicromato diluida y que corresponden a distintos valores de concentración de cloro. El resultado se registra como mg/l de cloro residual total disponible.

6. Al final de los otros períodos de contacto seleccionados, se repitió el procedimiento para determinar el cloro residual total disponible.

7. Se calcula la demanda de cloro deduciendo el cloro residual cuantificado a partir de la cantidad dosificada en cada frasco.

Los resultados consignados en la Tabla 103 son los obtenidos al realizar el ensayo durante el curso de evaluación realizado en el mes de abril de 1989 y son mostrados en la Figura 95.

El comportamiento de las curvas obtenidas difiere del típico a esperar para la curva de demanda de cloro. Las características de esta última son las siguientes:

- Graficados en escala natural los valores de dosis de cloro aplicado y el residual obtenido después del tiempo

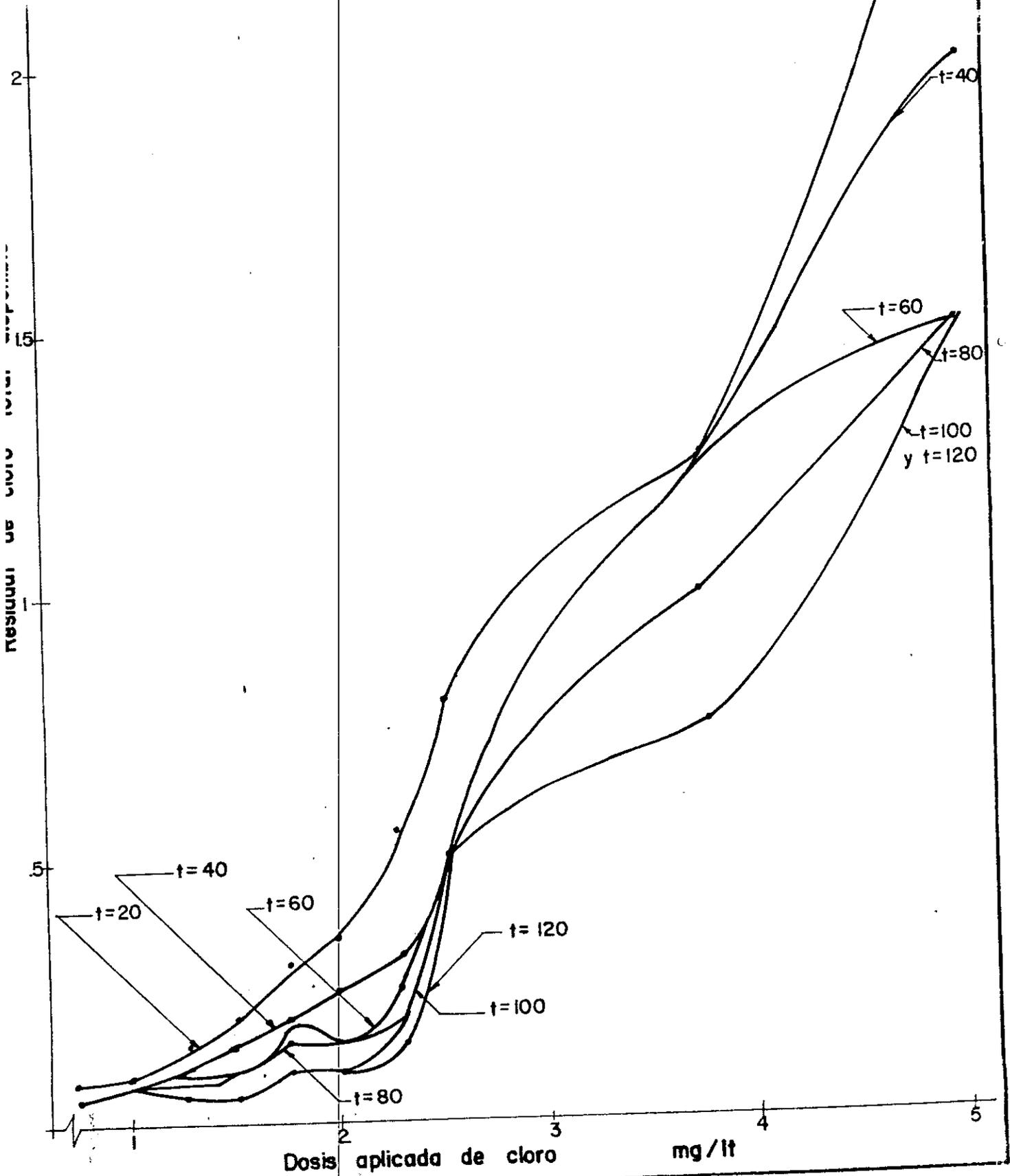
de contacto adoptado, se presenta una dosificación antes de la cual el valor del residual obtenido no es significativo. A esta dosis se le denomina demanda de cloro.

TABLA 103. Valores para curva de demanda de cloro.

No. de frasco	Cantidad aplicada mg	Dosis de cloro mg/l	Tiempos de contacto en minutos					
			20	40	60	80	100	120
1	0,60	0,756	0,08	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
2	0,80	1,008	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
3	1,00	1,260	0,15	0,10	0,10	0,08	0,05	0,05
4	1,20	1,512	0,20	0,15	0,10	0,10	0,05	0,05
5	1,40	1,764	0,30	0,20	0,20	0,15	0,10	0,10
6	1,60	2,016	0,35	0,25	0,15	0,15	0,10	0,10
7	1,80	2,268	0,55	0,32	0,25	0,50	0,20	0,15
8	2,00	2,520	0,80	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
9	3,00	3,780	1,25	1,25	1,25	1,00	0,75	0,75
10	4,00	5,040	2,50	2,00	1,50	1,50	1,50	1,50

- A partir de la dosis de la demanda de cloro, la curva de residual obtenido es creciente hasta alcanzar un punto máximo, a partir del cual decrece para mayores cantidades de cloro dosificado, hasta alcanzar un punto mínimo. Para dosis de cloro superiores a la correspondiente a este último punto, el residual de cloro obtenido será ahora siempre creciente.

FIGURA 95. CURVAS DE DEMANDA DE CLORO



El punto de residual mínimo se denomina punto crítico, punto de quiebre o "break point". Su determinación es fundamental para el control del proceso de desinfección, al permitir conocer que tipo de cloración se está haciendo en la planta. Así, si se está clorando con dosis por debajo a la correspondiente al punto crítico, se estará haciendo "cloración con residual combinado disponible" y con dosis mayores será "cloración con residual libre disponible".

Para lograr este objetivo la prueba debe hacerse con el cuidado necesario a fin de cuantificar todas las variables ya enunciadas que intervienen en la reacción del cloro y el agua.

En las pruebas realizadas, las curvas para períodos de contacto de 20 y 40 minutos, los intervalos de dosificación tomados no fueron suficientes para precisar la ubicación del punto crítico de cloración. Muy seguramente este debió situarse entre 1,5 y 2,0 mg/l por lo que se hacía necesario repetir la prueba para dosificaciones en este rango.

Para ilustrar la utilización de los resultados de esta prueba, se asume arbitrariamente que el punto crítico para la cloración con 20 minutos como tiempo de contacto, es de

2,0 mg/l. Para hacer cloración con residual libre disponible de 1,0 mg/l, valor deseable a la salida de la planta para garantizar residuales mayores a 0,1 mg/l en cualquier punto de la red de distribución, es necesario dosificar 3,08 mg de cloro por litro de agua tratada.

El promedio de cloro aplicado en las plantas evaluadas es de 2,67 mg/l. No obstante este promedio no es confiable dada la incertidumbre que se tiene en la determinación del caudal de agua tratado. No obstante, los registros de control de calidad muestran que la cloración ha sido adecuada para garantizar un residual de protección contra posibles contaminaciones posteriores en la red de distribución.

**5.5.3 Mecanismos y estructuras para la cloración.** Al hacer una inspección por las instalaciones propias del proceso de desinfección, se observa lo siguiente:

- La cámara de aplicación del cloro, no es del diseño típico para este tipo de unidades. El flujo que se da allí evidencia ser el mezclado, con tendencia al cortocircuito.
- El aseo de esta cámara es descuidado.
- Se evidencia a simple vista en este tanque, la presencia de arena proveniente de los fitros

- El acceso de particulares a la cámara es fácil, pues aunque tiene puerta con cerradura esta permanece abierta.
- De igual forma, el cuarto de dosificadores y el salón de bodega y maniobra de los cilindros con cloro, es de acceso libre a particulares. Debido a su ubicación sobre la vía de acceso a las oficinas de administración, un particular que viene con este rumbo, puede tener acceso a esta zona sin ser notado por los operadores o sus ayudantes.
- Los cloradores presentan deficiencias de pintura. Las conducciones no están debidamente codificadas con colores, para poder distinguirlas rápidamente.
- No existe dentro del cuarto de cloradores, ayudas visuales de como están dispuestas las instalaciones existentes. Tampoco hay señalizaciones de como hacer la detección de escapes de cloro.
- La precisión de los rotámetros y demás instrumentos de medida no son calibrados periódicamente.
- El estado de conservación del malacate sobre el puente grúa para maniobra de cilindros, así como el de las básculas, es aceptable. No obstante el malacate, de tipo manual con cadena, no resulta práctico en su operación. Esto impide que se haga el pesaje de cada cilindro de

cloro a su llegada a la planta, y que los tiempos de maniobra de cilindros resulten largos.

**5.5.4 Comportamiento de la desinfección en el tiempo.**  
Para evaluar el proceso de desinfección a lo largo del período de estudio, se tomaron los registros turbiedad, color, y de residuales de cloro obtenidos durante el mismo, en el laboratorio de la planta de tratamiento, para muestras tomadas en los tanques de almacenamiento 1 y 2 y en el registro o "manhole" de salida del agua producidas hacia la ciudad.

Estos datos aparecen registrados para las tres plantas en las Tablas 104 a 106 y se agrupan por rangos en la Tabla 107.

De la observación de este último se tiene que en el 75,2% del tiempo, se esta produciendo agua con residuales de cloro entre 0,5 y 1,0 mg/l. y que los residuales medidos en el tanque de la planta 3 son mayores a los obtenidos en los tanques 1 y 2. También se observa que la distribución de residuales obtenidos es muy dispersa, así sólo en el fracciones menores del tiempo se esta produciendo agua con residuales en el rango 0,9 - 1,0 mg/l: 15% en el tanque uno, 7,3% en el tanque dos, 20,6% en el tanque tres y 7,7% en el manhole de salida.

**TABLA 104.** Registros de turbiedad, color y residuales de cloro. Acueducto de Cartagena. Ene-Abr/89.

PLANTA DE TRATAMIENTO No. 1 - ACUEDUCTO DE CARTAGENA DE INDIAS  
EMPRESAS PUBLICAS MUNICIPALES DE CARTAGENA

DIA	ENERO						FEBRERO						MARZO						ABRIL					
	T	C	MH	T1	T2	T3	T	C	MH	T1	T2	T3	T	C	MH	T1	T2	T3	T	C	MH	T1	T2	T3
1							1,5	8,0	1,1	1,0	1,2	1,1	1,3	5,0	0,7	1,1	1,0	0,7	0,8	8,0	0,7	0,7	0,5	1,0
2	0,8	5,0	1,0	1,4	1,1	1,2							0,9	6,0	0,5	0,8	0,8	0,5						
3	0,4	2,0	0,8	0,8	1,2	1,0	1,1	6,0	0,8	0,8	1,0	1,1	0,5	4,0	0,4	0,4	0,4	0,5	0,8	6,0	0,8	0,8	0,5	0,9
4	0,6	4,0	0,7	0,9	0,9	1,3	1,9	9,0	1,8				0,5	5,0	0,5	0,4	0,7	0,5	0,7	6,0	0,9	0,8	0,7	1,0
5	0,5	5,0	1,3	1,6	1,2	1,0													0,7	6,0	0,5	0,4	0,3	0,7
6	1,3	5,0	0,6	0,7	0,4	0,9	0,9	7,0	1,0	1,2	1,2	1,1	0,9	5,0	0,4	0,4	0,3	0,6	0,7	5,0	0,6	0,5	0,4	0,8
7	0,5	5,0	0,8	0,9	0,6	1,2	0,5	5,0	0,9	0,9	0,8	0,9	1,0	5,0	0,6	0,9	1,5	0,9	0,5	4,0	0,7	0,7	0,5	0,8
8							0,6	5,0	1,2	1,3	1,3	1,6	1,0	5,0	0,5	0,7	0,8	0,5	0,7	6,0	0,4	0,5	0,2	0,9
9							0,5	5,0	0,9	1,4	1,1	1,3	1,2	6,0	0,4	0,5	0,5	0,7			0,5	0,5	0,4	0,8
10	0,9	4,0	0,6	0,9	0,7	0,8	0,7	5,0	1,0	1,0	0,9	1,2	0,7	6,0	0,7	0,9	1,0	0,9	0,6	5,0	0,4	0,6	0,6	0,5
11	0,7	5,0	0,7	0,5	0,3	1,3	0,6	5,0	0,6	0,7	0,7	0,8	1,7	6,0	0,7	0,6	0,3	1,7	1,3	5,0	0,8	0,7	0,8	0,1
12	1,0	5,0	0,7	0,8	0,6	1,1	0,9	4,0	1,1	1,2	1,1	1,2	1,5	6,0	0,6	0,7	0,8	0,8	0,6	5,0	0,8	0,9	0,8	1,0
13	0,9	6,0	1,0	1,4	1,2	0,9	0,6	5,0	0,7	0,9	1,1	0,8	0,8	6,0	0,6	0,6	1,1	0,8	0,7	5,0	0,8	0,8	0,9	0,9
14	0,6	5,0	0,8	1,1	0,8	0,9	0,6	5,0	0,7	0,8	1,1	0,7	1,1	6,0	0,8	0,9	1,1	1,0	0,7	5,0	0,7	0,8	0,6	0,8
15	0,9	4,0	0,9	0,8	0,9	1,1	0,8	5,0	0,6	1,3	1,2	0,7	0,7	5,0	0,8	0,8	0,6	1,0	0,7	5,0	0,8	1,0	0,8	0,9
16	0,9	4,0	0,7	1,1	0,7	0,7	0,9	4,0	1,0	1,2	1,3	1,0	1,0	6,0	0,6	0,8	0,7	0,7	0,9	5,0	1,0	1,0	0,9	1,2
17	0,6	3,0	0,7	0,8	0,7	0,8	1,1	5,0	0,6	0,6	1,1	0,7	1,3	5,0	0,5	0,7	0,7	0,6	0,7	5,0	0,6	0,8	0,5	1,0
18	0,7	4,0	0,7	0,8	0,8	0,9	0,7	6,0	0,4	0,6	1,2	0,5	0,4	5,0	1,0	1,1	1,1	0,9	0,8	5,0	0,7	0,7	0,7	0,7
19	1,5	8,0	0,8	0,8	0,8	1,2							0,5	4,0	0,6	0,8	0,8	0,7	0,7	6,0	0,7	0,8	0,8	0,9
20	0,7	6,0	0,8	0,9	0,9	0,9	0,6	5,0	0,7	0,6	0,7	1,0							0,8	5,0	0,9	0,9	0,9	0,8
21							0,7	5,0	0,8	0,7	1,0	1,0	1,1	6,0	0,6	0,7	0,7	0,8	1,3	6,0	0,9	0,9	0,8	0,9
22							0,7	5,0	0,8	1,7	1,5	0,1	1,2	6,0	0,5	0,8	0,9	0,7	0,7	5,0	0,7	0,8	0,6	0,9
23	0,7	5,0	1,0	1,2	1,2	1,1	0,6	5,0	0,2	0,7	2,0	0,0							1,2	6,0	0,5	0,7	0,2	0,9
24	0,8	6,0	0,8	0,8	0,7	0,9	0,8	5,0	0,7	0,8	1,0	1,0	1,1	5,0	0,8	0,6	0,6	1,1	1,4	6,0	0,6	0,8	0,5	0,8
25	0,6	4,0	1,0	0,9	0,8	1,1	0,7	5,0	0,9	1,0			1,5	6,0	0,6	0,6	0,5	0,9	1,4	5,0	0,4	0,6	0,2	0,7
26	0,6	5,0	0,9	0,8	0,8	1,1	0,8	5,0	0,8	1,0	1,1	1,0	1,7	5,0	0,6	0,7	0,4	1,3	1,4	6,0	0,5	0,6	0,3	0,7
27	1,5	6,0	0,7	0,9	1,0	0,9	0,6	5,0	0,8	1,0	1,1	0,9	1,8	6,0	0,6	0,7	0,1	1,3	1,2	6,0	0,6	0,1	0,3	0,1
28							0,9	5,0	0,5	0,6	0,4	0,9	1,4	7,0	0,8	0,7	0,4	0,8	1,0	6,0	0,8	1,0	1,0	0,9
29	0,6	6,0	0,8	0,7	0,8	1,0							1,1	6,0	0,8	0,9	0,4	1,0						
30	1,2	6,0	1,3	1,6	1,4	1,0							0,8	6,0	0,9	0,9	0,8	1,0	1,7	6,0	0,6	0,7	0,5	0,8
31	1,3	6,0	1,0	1,2	0,9	1,0							0,7	5,0	0,9	0,8	0,7	1,0						
MIN	0,4	2,0	0,6	0,5	0,3	0,7	0,5	4,0	0,2	0,6	0,4	0,0	0,4	4,0	0,4	0,4	0,1	0,5	0,5	4,0	0,4	0,1	0,2	0,1
MAX	1,5	8,0	1,3	1,6	1,4	1,3	1,9	9,0	1,8	1,7	2,0	1,6	1,8	7,0	1,0	1,1	1,5	1,7	1,7	8,0	1,0	1,0	1,0	1,2
LEC	25	25	25	25	25	25	25	25	25	24	23	24	28	28	28	28	28	28	27	27	28	28	28	28
PRO	0,8	5,0	0,8	1,0	0,9	1,0	0,8	5,4	0,8	1,0	1,1	0,9	1,1	5,5	0,6	0,7	0,7	0,9	0,9	5,5	0,7	0,7	0,6	0,8

T - Turbiedad (U.N.T.)      C - Color (U.C.)      MH - Residual de cloro en el manhole a la salida  
 T1 - Residual de cloro en el tanque no. 1 (ppm)      T2 - Residual de cloro en el tanque no. 2 (ppm)  
 T3 - Residual de cloro en el tanque no. 3 (ppm)

**TABLA 105. Registros de turbiedad, color y residuales de cloro. Acueducto de Cartagena. May-Ago/89.**

PLANTA DE TRATAMIENTO No. 1 - ACUEDUCTO DE CARTAGENA DE INDIAS  
EMPRESAS PUBLICAS MUNICIPALES DE CARTAGENA

DIA	MAYO						JUNIO						JULIO						AGOSTO					
	T	C	MH	T1	T2	T3	T	C	MH	T1	T2	T3	T	C	MH	T1	T2	T3	T	C	MH	T1	T2	T3
1							1,9	7,0	0,7	0,5	0,2	1,0	1,5	6,0	1,0	1,4	1,2	0,7	1,1	7,0	0,7	0,7	0,5	0,9
2	2,4	7,0	0,9	1,0	0,9	1,0	1,2	7,0	0,8	1,0	0,5	1,2	1,5	6,0	1,0	1,1	1,0	1,3	1,5	6,0	0,7	0,6	0,3	1,2
3	1,5	6,0	0,8	0,9	0,8	0,9	1,0	6,0	0,4	0,1	0,1	1,1	1,7	7,0	0,8	1,2	0,7	1,2	0,8	5,0	0,7	0,8	0,5	0,9
4	1,6	6,0	0,8	1,0	0,7	1,0	1,3	6,0	0,6	0,8	0,2	0,9	1,6	6,0	0,8	0,8		1,1	1,0	8,0	0,5	0,7	0,2	0,9
5	1,8	6,0	0,7	0,9	0,8	1,0							1,7	7,0	1,0	0,8	0,6	1,1						
6							1,0	12,0	0,6	0,7	0,1	1,0	1,4	5,0	0,7	1,0	0,8	0,9						
7							1,4	7,0	1,2	1,2	0,4	1,6	1,1	6,0	1,0	1,5	1,2	1,6						
8							1,3	6,0	0,9	1,2	0,3	1,0	1,2	6,0	1,1	1,1	1,0	1,3	1,1	6,0	0,5	0,1	0,5	1,1
9	1,6	5,0	0,6	1,1	1,0	0,4	2,0	9,0	0,7	0,6	0,5	0,9							1,0	7,0	1,1	0,7	0,7	1,5
10	1,6	6,0	0,2	0,3	0,8	0,3			0,8	1,0		0,9	1,4	6,0	0,8	0,8	0,7	1,1	0,9	6,0	0,6	0,7	0,6	0,8
11	0,7	13,0	0,5	0,7	0,6	0,9							1,5	6,0	0,9	0,9	0,9	1,0	1,6	8,0	0,5	0,5	0,1	1,0
12	1,0	11,0	0,7	0,8	0,9	0,7	1,3	11,0	0,7	0,8	0,6	0,7	1,1	7,0	0,8	0,8	0,9	0,6						
13							0,8	6,0	0,8	1,0	0,9	0,8	1,3	7,0	0,8	0,9	0,6	0,7						
14							1,5	6,0	0,3	0,7	0,1	0,9	1,6	7,0	0,6	0,7	0,6	0,8	0,8	13,0	0,7	0,8	0,3	0,9
15	1,5	6,0	0,5	0,6	0,9	0,6	1,4	7,0	0,6	0,6	0,1	1,3							0,9	6,0	0,8	0,8	0,4	1,0
16	1,3	5,0	0,9	1,0	0,5	1,2	0,9	6,0	1,0	0,9	0,8	1,3	1,8	8,0	0,7	0,8	0,7	1,1	0,9	6,0	0,8	0,9	0,1	1,1
17	1,0	6,0	0,8	1,0	0,7	0,9	1,0	8,0	0,7	0,8	0,2	1,2	1,2	9,0	0,7	0,8	0,7	0,9	1,1	7,0	0,8	0,9	0,5	1,1
18	1,0	6,0	0,8	0,7	0,7	0,9		6,0	0,8	0,6	0,5	1,2	1,5	6,0	0,8	0,7	0,6	1,0	1,5	9,0	0,7	0,7	0,4	0,8
19	0,9	5,0	1,0	1,2	0,6	1,2	0,8	6,0	1,0	1,0	0,7	1,4	1,5	6,0	0,7	0,7	0,6	0,8						
20	1,3	5,0	1,0	1,1	0,6	1,3	1,3	6,0	0,6	0,7	0,4	0,7							1,3	8,0	0,8	0,9	0,4	0,8
21							1,3	6,0	0,9	1,0	0,4	1,2	1,9	6,0	0,7	0,7	0,6	1,0						
22	1,0	6,0	0,5	0,6	0,3	0,6	1,8	6,0	0,6	0,8	0,7	1,0	1,6	7,0	0,7	0,9	0,7	0,5	2,1	7,0	0,5	0,5	0,1	0,8
23	1,4	7,0	0,3	0,2	0,1	0,6	1,4	6,0	0,7	0,9	0,6	0,9							1,0	9,0	0,9	0,8	0,7	1,1
24	1,4	9,0	0,4	0,5	0,1	0,7	1,8	6,0	0,8	1,2	0,7	1,3	1,8	14,0	0,7	0,8	0,2	1,1	1,4	9,0	0,4	0,4	0,1	0,2
25	1,8	7,0		1,9		0,8	1,5	6,0	0,8	0,4	0,5	1,1	1,0	9,0	1,0	1,0		0,9	1,6	7,0	1,0	1,1	0,6	1,4
26	1,0	7,0	0,4	0,4	0,2	0,6	1,8	7,0	0,8	0,9	0,7	1,1	1,8	10,0	0,5	0,7		0,8	1,4	7,0	0,7	0,9	0,6	1,0
27				0,9		0,5	1,8	6,0	0,8	0,9	0,2	1,2	1,3	9,0	0,5	0,6		0,9						
28	1,1		0,8	0,9	0,6	1,2	2,0	6,0	0,8	0,8	0,3	1,6	1,0	9,0	0,2	0,2		0,6	1,0	8,0	0,8	1,0	0,6	1,3
29	0,8	5,0	0,6	0,5		1,2	1,9	6,0	1,0	0,4	0,3	1,6	1,1	10,0	0,2	0,3		0,7	2,0	9,0	1,1	1,1	0,9	1,2
30	1,0	7,0	0,6	0,6	0,3	0,9	1,8	7,0	1,0	0,9	0,8	1,3							1,9	7,0	1,0	1,1	1,0	1,0
31	1,6	7,0	0,3	0,3	0,1	0,8							0,9	6,0	0,8	0,8	0,3	0,9	1,0	7,0	0,7	0,8	0,6	0,8
MIN	0,7	5,0	0,2	0,2	0,1	0,3	0,8	6,0	0,3	0,1	0,1	0,7	0,9	0,0	0,2	0,2	0,2	0,5	0,8	5,0	0,4	0,1	0,1	0,2
MAX	2,4	13,0	1,0	1,9	1,0	1,3	2,0	12,0	1,2	1,2	0,9	1,6	1,9	14,0	1,1	1,5	1,2	1,6	2,1	13,0	1,1	1,1	1,0	1,5
LEC	23	22	22	24	21	24	26	27	28	28	27	28	26	27	26	26	20	26	23	23	23	23	23	23
PRD	1,3	6,8	0,6	0,8	0,6	0,8	1,4	6,8	0,8	0,8	0,4	1,1	1,4	7,1	0,7	0,8	0,7	0,9	1,3	7,5	0,7	0,8	0,5	1,0

T - Turbiedad (U.N.T.)      C - Color (U.C.)      MH - Residual de cloro en el manhole a la salida  
 T1 - Residual de cloro en el tanque no. 1 (ppm)      T2 - Residual de cloro en el tanque no. 2 (ppm)  
 T3 - Residual de cloro en el tanque no. 3 (ppm)

**TABLA 106.** Registros de turbiedad, color y residuales de cloro. Acueducto de Cartagena. Sep-Dic/89.

PLANTA DE TRATAMIENTO No. 1 - ACUEDUCTO DE CARTAGENA DE INDIAS  
EMPRESAS PUBLICAS MUNICIPALES DE CARTAGENA

DIA	SEPTIEMBRE						OCTUBRE						NOVIEMBRE						DICIEMBRE					
	T	C	MH	T1	T2	T3	T	C	MH	T1	T2	T3	T	C	MH	T1	T2	T3	T	C	MH	T1	T2	T3
1	1,0	6,0	0,9	0,9	0,6	1,1	1,7	6,0	0,6	0,5	0,2	0,9	1,8	6,0	1,0	1,1	0,8	1,2	1,0	6,0	0,8	0,8	0,5	1,0
2							1,9	7,0	0,4	0,6	0,2	0,7	1,5	6,0	0,5	0,7	0,6	0,8	0,9	5,0	0,7	0,5	0,6	1,0
3	1,3	8,0	0,5	0,4	0,5	0,8	1,8	6,0	0,5	0,5	0,3	0,9	1,4	5,0	1,0	1,2	1,1	1,1						
4	2,7	8,0	0,2	0,6	0,1	1,2	2,1	5,0	0,6	0,7	0,3	1,0	1,6	5,0	0,9	1,0		0,9	1,1	5,0	0,8	0,8	0,4	1,0
5	1,5	8,0	0,5	0,5	0,2	1,0	2,4	6,0	0,6	0,6	0,6	0,8							1,3	6,0	0,8	0,6	0,5	1,0
6	1,9	6,0	0,4	0,4	0,1	0,7	1,4	6,0	0,7	0,6	0,5	1,2							1,5	6,0	0,9	0,9	0,7	1,0
7	1,5	5,0	0,6	0,6	0,1	1,1							1,9	6,0	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0	5,0	0,7	0,7	0,5	0,9
8	1,3	6,0	0,7	0,5	0,2	0,9							1,9	6,0	0,7	0,8	0,8	1,0						
9							1,2	5,0	0,5	0,7	0,7	0,2	2,8	6,0	0,9	1,0	0,9	1,0	1,9	7,0	0,6	0,5		0,7
10							1,8	6,0	1,1	1,0	1,0	1,2												
11	1,4	5,0	0,1	0,1	0,0	0,4	2,6	6,0	1,0	1,0	0,9	1,2			1,0	1,0	1,0	0,9	1,8	7,0	0,5	0,5	0,3	0,7
12	2,1	6,0	0,7	0,7	0,3	0,9	1,7	5,0	1,0	1,2	0,9	1,1							2,6	6,0	0,7	0,9	0,8	0,8
13	1,0	5,0	0,4	0,6	0,5	0,9	0,7	5,0	0,8	1,0	0,8	1,1			0,8	0,9	0,9	0,9	0,8	7,0	0,7	0,7	0,4	0,9
14	1,3	5,0	0,7	0,8	0,6	1,1	1,2	6,0	0,9	0,8	0,5	1,1	2,6	7,0	0,7	0,8	0,7	0,8	1,1	6,0	0,4	0,5	0,5	0,2
15							1,3	6,0	0,9	1,2	0,7	1,2	2,3	7,0	0,9	0,9	0,8	1,0	1,9	7,0	0,6	0,7	0,5	1,0
16													1,9	7,0	0,9	1,0	0,7	1,1						
17	1,1	6,0	0,5	0,5	0,5	0,9	1,5	6,0	0,8	0,9	0,8	1,1	1,8	6,0	0,8	1,0	0,8	0,9						
18	1,2	7,0	0,6	0,7	0,6	0,7	1,6	7,0	0,7	0,4	0,3	1,2	1,8	7,0	1,0	0,8	0,7	1,6	1,0	6,0	0,5	0,6	0,4	0,8
19	1,5	7,0	0,6	0,5	0,5	0,6	1,4	7,0	0,7	0,8	0,8	0,8							1,0	6,0	0,8	0,9	0,6	1,0
20	1,5	7,0	0,8	0,8	0,6	1,0	1,3	5,0	1,0	1,0	0,9	1,1	1,6	6,0	0,5	0,8	0,7	0,8	1,4	7,0	0,8	0,9	0,6	1,1
21	1,5	5,0	0,7	0,8	0,7	1,0							1,5	6,0	1,0	0,8	0,8	0,9	1,5	6,0	0,7	0,8	0,4	0,8
22	1,4	5,0	0,9	1,0	0,8	1,0							1,8	6,0	0,8	0,8	0,7	1,0	1,0	5,0	0,5	0,7	0,5	1,0
23							1,4	6,0	0,8	0,8	0,4	0,9	1,9	5,0	0,8	0,8	0,5	0,7	0,8	5,0	0,8	0,8	0,5	0,9
24							1,9	19,0	0,6	0,5	0,3	0,9	2,0	9,0	0,4	0,6	0,5	0,0			0,7	0,7	0,6	0,9
25	2,1	6,0	0,6	0,6	0,2	1,0	1,0	4,0	1,1	1,1	0,9	1,1												
26	1,7	5,0	0,8	0,8	0,4	0,9	1,0	4,0	0,9	1,0	0,7	0,9	1,6	5,0	0,9	1,3	0,8	1,1	0,9	5,0	0,7	0,9	0,4	1,0
27	1,6	5,0	0,6	0,5	0,3	1,0	1,2	6,0	0,5	0,6	0,3	0,8	1,4	6,0	0,7	0,7	0,7	0,8	1,1	6,0	0,8	1,0	0,6	1,0
28	1,8	6,0	0,8	0,8	0,5	1,2							1,7	6,0	0,7	0,7	0,5	0,9	1,2	7,0	0,6	0,9	0,6	0,8
29	1,3	7,0	0,7	0,7	0,5	1,0	1,4	6,0	0,8	1,1	0,7	1,0	0,9	6,0	0,8	0,9	0,7	0,9	1,0	7,0	0,8	0,8	0,7	0,9
30							1,8	6,0	0,6	0,9	0,7	0,6	0,7	6,0	0,6	0,7	0,5	0,9						
31							1,4	5,0	0,9	1,1	0,6	0,8												
MIN	1,0	5,0	0,1	0,1	0,0	0,4	0,7	4,0	0,4	0,4	0,2	0,2	0,7	5,0	0,4	0,6	0,5	0,0	0,8	5,0	0,4	0,5	0,3	0,2
MAX	2,7	8,0	0,9	1,0	0,8	1,2	2,6	19,0	1,1	1,2	1,0	1,2	2,8	9,0	1,0	1,3	1,1	1,6	2,6	7,0	0,9	1,0	0,8	1,1
LEC	22	22	22	22	22	22	25	25	25	25	25	25	22	22	24	24	23	24	22	22	23	23	22	23
PRD	1,5	6,1	0,6	0,6	0,4	0,9	1,5	6,2	0,8	0,8	0,6	1,0	1,7	6,1	0,8	0,9	0,7	0,9	1,3	6,0	0,7	0,7	0,5	0,9

T - Turbiedad (U.N.T.)      C - Color (U.C.)      MH - Residual de cloro en el manhole a la salida  
T1 - Residual de cloro en el tanque no. 1 (ppm)      T2 - Residual de cloro en el tanque no. 2 (ppm)  
T3 - Residual de cloro en el tanque no. 3 (ppm)

**TABLA 107.** Frecuencia de presentación de valores de cloro residual. Acueducto de Cartagena.

RESIDUAL DE CLORO - VALORES PROMEDIO MEDIDOS DURANTE EL AÑO DE 1989

RANGOS DE Cl RESIDUAL	TANQUE 1			TANQUE 2			TANQUE 3			SALIDA DE LA PLANTA		
	FRECUENCIAS			FRECUENCIAS			FRECUENCIAS			FRECUENCIAS		
	n	%	% acum.	n	%	% acum.	n	%	% acum.	n	%	% acum.
0,0 - 0,09	0	0,0	0	8	2,8	2,8	2	0,7	0,7	0	0,0	0,0
0,1 - 0,19	5	1,7	1,7	17	5,9	8,7	3	1,0	1,7	2	0,7	0,7
0,2 - 0,29	3	1,0	2,7	11	3,8	12,5	3	1,0	2,7	5	1,7	2,3
0,3 - 0,39	3	1,0	3,7	20	7,0	19,5	1	0,3	3,0	6	2,0	4,3
0,4 - 0,49	11	3,7	7,3	20	7,0	26,5	4	1,3	4,3	18	6,0	10,4
0,5 - 0,59	24	8,0	15,3	39	13,6	40,1	7	2,3	6,7	31	10,4	20,7
0,6 - 0,69	33	11,0	26,3	38	13,2	53,3	17	5,7	12,3	45	15,1	35,8
0,7 - 0,79	46	15,3	41,7	40	13,9	67,2	20	6,7	19,0	53	17,7	53,5
0,8 - 0,89	59	19,7	61,3	32	11,1	78,4	41	13,7	32,7	73	24,4	77,9
0,9 - 0,99	45	15,0	76,3	21	7,3	85,7	62	20,7	53,3	23	7,7	85,6
1,0 - 1,09	31	10,3	86,7	13	4,5	90,2	56	18,7	72,0	32	10,7	96,3
1,1 - 1,19	16	5,3	92,0	12	4,2	94,4	37	12,3	84,3	6	2,0	98,3
1,2 - 1,29	12	4,0	96,0	10	3,5	97,9	24	8,0	92,3	2	0,7	99,0
1,3 - 1,39	3	1,0	97,0	2	0,7	98,6	13	4,3	96,7	2	0,7	99,7
1,4 - 1,49	4	1,3	98,3	1	0,3	99,0	2	0,7	97,3		0,0	99,7
1,5 - 1,59	1	0,3	98,7	2	0,7	99,7	1	0,3	97,7		0,0	99,7
1,6 - 1,69	2	0,7	99,3		0,0	99,7	6	2,0	99,7		0,0	99,7
1,7 - 1,79	1	0,3	99,7		0,0	99,7	1	0,3	100,0		0,0	99,7
1,8 - 1,89		0,0	99,7		0,0	99,7				1	0,3	100,0
1,9 - 1,99	1	0,3	100,0		0,0	99,7						
2,0 - 2,09				1	0,3	100,0						
	300			287			300			299		

## 6. EVALUACION DE LA OPERACION

### 6.1 ASPECTOS GENERALES Y DEFINICIONES

La operación de una planta de tratamiento consiste en la serie de actividades sistemáticas que se realizan para transformar el agua cruda recibida en agua potable, de calidad y en cantidad suficiente para satisfacer a los usuarios.

Dentro de una empresa de servicios públicos - Acueducto y Alcantarillado - estas actividades deben estar perfectamente localizados dentro de la organización operacional de la misma.

Se define aquí sistema como la combinación de partes reunidas para obtener un resultado. Este último es la prestación de servicios públicos a una comunidad. Así los sistemas constitutivos de la empresa serán los de: planificación, comercial, financiero, operacional y administrativo.

El sistema operacional debe atender a las siguientes funciones: estudiar y elaborar proyectos según la política y normas de desarrollo de la empresa; ejecutar la construcción de esos proyectos y/o velar porque estos se hagan de acuerdo a sus especificaciones; generar los servicios que preste la empresa a la comunidad en forma adecuada y al menor costo; hacer el mantenimiento de estructuras y equipos de la empresa; proveer información suficiente y ordenada de todas las actividades que realiza, dando soporte al buen desempeño de los demás sistemas de la empresa.

Para el buen desempeño de estas funciones resultan tres subsistemas : proyectos, operación y mantenimiento.

Las funciones básicas del subsistema de operación deben ser la operación de las estructuras y equipos, el control del funcionamiento de los mismos y el control de calidad de los servicios prestados. Esta es la posición que corresponde a la planta de tratamiento dentro del árbol organizacional de la empresa.

La operación de las plantas de tratamiento constituye una de las partes más importantes del sistema de operación porque del buen funcionamiento de esta depende la calidad de agua que la empresa entregará a sus usuarios.

Los objetivos específicos de la operación de una planta de tratamiento son:

- Suministrar a los usuarios agua en cantidad y calidad adecuados.
- Garantizar el suministro continuo del líquido ajustado a las especificaciones pre-establecidas.
- Operar y hacer mantenimiento de las edificaciones y equipos requeridos para el tratamiento.
- Lograr que los procesos necesarios para el tratamiento se verifiquen a los menores costos posibles.

Los elementos que hacen posible la operación de la planta de tratamiento son:

1. El agua cruda recibida de las estaciones de captación.
2. Las instalaciones y equipos necesarios.
3. Los procesos que se desarrollan para el tratamiento.
4. Las sustancias químicas que se requieran en esos procesos.
5. Los repuestos y accesorios para el mantenimiento de instalaciones y equipos.
6. El personal calificado para manejo.
7. El laboratorio que controla la calidad del producto final.
8. Las normas de calidad del agua y de procedimientos a realizar.

Las actividades de operación de una planta de tratamiento pueden dividirse internamente en cuatro: operación, mantenimiento, control de calidad y administración.

Las actividades de operación comprenden la puesta en marcha de equipos, verificación de los procesos, supervisión y control de los mismos y de las demás instalaciones de la planta. Incluye también la recolección de información de operaciones y variables bajo su control.

Las actividades de mantenimiento comprenden las tareas necesarias que garanticen el buen funcionamiento de equipos y estructuras de la planta, así como la generación de información suficiente para llevar las estadísticas de mantenimiento.

Las actividades de control de calidad deben garantizar que el agua suministrada cumpla con las especificaciones de calidad establecidas o adoptadas y monitorear la eficiencia de los distintos procesos aplicados.

La administración la constituyen las actividades que proveen el apoyo organizacional suficiente para que las demás actividades se desarrollen de la mejor forma posible.

En la planta de tratamiento de El Bosque encontramos que estas actividades se desarrollan con la siguiente planta de personal:

#### **Operación**

- Los operadores, responsables en su turno.
- Los ayudantes de operación.

#### **Mantenimiento**

- El mecánico
- El electricista
- El instrumentista
- El ayudante del mecánico.

#### **Control de calidad**

- El químico bacteriólogo
- Los auxiliares de laboratorio.

#### **Administración**

- El administrador de la planta
- El jefe de operaciones
- Los celadores
- Los aseadores
- Los conductores
- Los obreros de planta.

En resumen, dentro de los procesos del sistema de operación, el manejo de la planta de tratamiento puede compararse con el de cualquier industria de la línea de bienes de consumo. Tiene como materia prima o insumos el producto de las actividades de captación y conducción del agua. Desarrolla unos procesos por medio de sus elementos y tiene como producto final de consumo, el agua de calidad adecuada que entrega al subsistema de distribución.

Así las bases fundamentales para su máxima eficiencia serán:

- Unas políticas claras sobre su cobertura así como las normas y procedimientos establecidos por la empresa y en concordancia con los criterios de saneamiento de orden superior.
- Las técnicas actualizadas correspondientes acorde con los progresos de la ingeniería sanitaria.
- El conocimiento amplio y preciso tanto de las instalaciones y equipos que conforman la parte física como de las condiciones de su operación.
- Una dirección administrativa dinámica que entienda que a pesar de la función pública que desempeña, la planta de tratamiento puede dirigirse como si fuese una industria de capital privado, y como tal es capaz de producir unas utilidades, que deben revertirse para su modernización y mejor prestación del servicio.

Es de esperar que la planta de tratamiento también presente restricciones en el desarrollo de sus objetivos, las cuales deben ir eliminandose en medida de las posibilidades.

Las principales restricciones que suelen darse, y que afectan no solamente a la planta, sino a todo el sistema de operación de la empresa, son:

- La no disponibilidad oportuna de los recursos necesarios (humanos, técnicos, materiales y financieros).
- La insuficiencia de las fuentes de agua para suministrar las cantidades necesarias de agua cruda.
- Las fallas en el correcto y oportuno mantenimiento de los equipos existentes.
- La dependencia marcada de un sólo sistema de potencia (electricidad).

La severidad con que pueda verse afectada la operación por estas restricciones distingue tres situaciones distintas de operación:

**Normal:** Cuando las cantidades de agua a tratar son las esperadas y no se han dado eventos imprevistos ni en la calidad del agua ni en las estructuras y equipos.

**Deficitaria:** Cuando no se producen las cantidades y calidades necesarias para satisfacer a la población por insuficiencias de las estructuras o del agua a tratar.

**De emergencia:** Cuando en cualquiera de las dos situaciones anteriores se presenta una modalidad extraordinaria que afecta sensiblemente la prestación del servicio. Este evento puede ser una avería grande en una de las estructuras principales, una gran sequía o una situación de catástrofe por sismo, huracán, inundación etc.

Para evaluar la operación de las plantas de tratamiento uno y dos del acueducto de Cartagena, se tratan por separado cada una de las cuatro actividades competentes de la operación. Así se evalúa la operación de equipos y procesos; el mantenimiento; el control de calidad; y la administración.

La metodología a usar se basa en una serie de entrevistas al personal de la planta y observaciones hechos por el evaluador durante el tiempo que estuvo dedicado al estudio de la planta de tratamiento.

## 6.2 EVALUACION DE LAS MANIOBRAS DE OPERACION

El propósito de evaluar la operación es conocer como se ejecutan y controlan los diversos procesos a que se somete el agua cruda, su potabilización y posterior entrega para distribución a la ciudad.

Los aspectos evaluados fueron:

- El personal de la planta de tratamiento.
- Los procedimientos de control.
- Los recursos complementarios.
- La supervisión.
- El manual de operación.
- El balance de agua.
- La operación de equipos especiales.
- La operación eventual.
- La operación de emergencias.

Antes de tratar cada uno de estos aspectos, se presenta a continuación una descripción general de lo que es la operación normal que se da actualmente en las plantas uno y dos; así como los principales controles aplicables a cada proceso.

**6.2.1 Descripción de la operación normal.** La operación conjunta de las dos plantas está a cargo de un operador y sus dos ayudantes de operación, quienes desempeñan sus funciones durante un turno de doce horas, a partir de las siete de la mañana o de la noche según les corresponda el turno. Laboran su turno y descansan 24 horas.

El agua cruda llega a los tanques de compensación donde se mezcla y distribuye a las distintas plantas. Una tubería

de 1,07 m de diámetro alimenta a la planta tres y una de 0,76 m a las plantas 1 y 2. Ambas tienen su válvula de compuerta. La correspondiente a las plantas 1 y 2 esta siempre totalmente abierta.

La tubería de  $\phi = 0,76$  m se reduce a  $\phi = 0,61$  y pasa por un medidor de caudal del tipo vénturi que no está siendo usado por falta del manómetro diferencial y la correspondiente curva de calibración.

La aplicación del sulfato de aluminio se realiza sobre esta tubería unos metros antes de llegar al tanque de mezcla rápida. La cámara de mezcla es del tipo retromezclador hidráulico con tiempos de retención aproximados de 150 segundos y gradiente de agitación de  $200 \text{ s}^{-1}$ . La dosificación se hace con un sólo dosificador del tipo volumétrico.

El operador chequea con frecuencia horaria el peso dosificado en un minuto y hace cálculos para establecer que corresponda a la dosis óptima a aplicar que le ha sido dada por el auxiliar de laboratorio, según ensayo de jarras que se hace en la mañana. La dosis aplicada no se cambia durante el día excepto cuando el operador nota que cambia la proporción de agua de Gambote (más turbia) en la mezcla o varía el caudal, según informe que recibe

horariamente por radio desde las estaciones de bombeo.

El caudal de agua cruda llegada a los tanques de compensación lo estiman aproximadamente según el número de bombas en líneas en las distintas estaciones. El correspondiente a las plantas 1 y 2 lo hallan restando al total el caudal medido en un vertedero de pared gruesa instalado en la planta 3.

Los ayudantes de operación tienen a su cargo el mantener llenas las tolvas con el sulfato de aluminio. El consumo por turno está entre 35 y 40 bultos de 50 kilos. Los ayudantes de patio son los encargados de subir durante el día el sulfato de aluminio necesario hasta el tercer piso donde estan las tolvas. Lo hacen usando el elevador de la planta, y la orden la reciben directamente del jefe de operaciones.

**Floculación.** De la cámara de mezcla rápida pasa el agua por tubos de  $\phi = 0,61$  m a los tanques de floculación hidráulica. Puede observarse que las calidades del floc formado en cada uno de los tres floculadores son muy distintas.

El operador no ejerce mayor control sobre este proceso. Lo inspecciona y si está muy lleno de natas sobrenadantes

asigna a uno de sus ayudantes para que las retire. Una de las causas de la formación de estas natas en abundancia parece ser la sobredosis de sulfato aplicado, resultante de no existir la certeza del caudal tratado. Esporádicamente se hace lavado de las paredes de los flocladores con chorros de agua a presión.

**Sedimentación.** La distribución del agua floclada se hace por un canal transversal situado al extremo de los tanques de sedimentación. Esta distribución no es regular si no que depende de las condiciones de filtración. Así cuando los filtros de la planta dos están en sus primeras horas de operación y coincide que los de la planta uno en general están el final de su carrera de filtración, se produce flujo de parte del agua floclada de la planta uno hacia la planta dos. No obstante en la mayor parte del tiempo pasa agua de la planta dos hacia la uno.

El control que se realiza sobre el proceso se limita a una inspección ocular general, incluyendo los tubos de rebose para verificar que no se estén produciendo fugas por las válvulas de desagüe.

En los sedimentadores 2 y 3 de la planta dos, los ayudantes de operación realizan periódicamente labores de limpieza de uno de ellos. Lavan los canales de

recolección de agua decantada que se llenan de algas muy rápido. Es notorio así mismo la formación de algas y musgos sobre las paredes de los sedimentadores.

**Filtración.** Las unidades de filtración de las plantas uno y dos son del tipo rápidas de tasa declinante. Las carreras de filtración van desde las 18 horas hasta las 40 horas. El lavado de los filtros lo hace el operador. Por lo general lava 3 ó 4 filtros durante el turno. La selección del filtro a lavar la hace según el número de horas que tenga de operación y el nivel de agua dentro de la caja del filtro. El más colmatado presentará un nivel más alto que los demás.

No se llevan controles por parte del operador de la calidad del agua filtrada. Los datos de pérdida de carga y caudal filtrado, tampoco tiene forma de registrarlos por encontrarse los respectivos medidores fuera de servicio.

Respecto al lavado de los filtros el operador no controla periódicamente la velocidad del agua de lavado ni el porcentaje de expansión del lecho. El problema comúnmente encontrado es el deficiente lavado del filtro. Esto es evidenciado por los movimientos del lecho de grava, el resquebrajamiento del lecho de arena y la pérdida del material filtrante. Sólo se encuentran trazas de antracita

máscaras contra cloro no esten ubicadas en un sitio de fácil acceso, y no se cuente con un equipo de oxígeno de emergencia. Así mismo, aunque los accidentes no sean frecuentes, debe llevarse una estadística de los mismos y un control general sobre posibles alergias respiratorias y/o cutáneas desarrolladas por el personal de la planta de tratamiento.

6.5.2 Gestión de materiales. Para garantizar el normal funcionamiento de la planta es necesario que los materiales, tanto sustancias químicas como repuestos, sean solicitados oportunamente al departamento de suministros de las Empresas Públicas Municipales, a fin de que se encuentren ya en la planta en el momento de su requisición.

La solicitud será oportuna en la medida en que se lleve en la planta un debido control al almacenamiento y el nivel mínimo de existencias, complementandose con el conocimiento que se tenga de proveedores y plazos de entrega de productos.

En la planta de tratamiento, la gestión de materiales comprende el almacenamiento, la manutención de un nivel mínimo de existencias y las gestiones para adquisición de estos mismos elementos.

Se diferencian tres tipos de elementos a almacenar: las sustancias químicas para el tratamiento, los repuestos y los reactivos de laboratorio.

El depósito de sustancias químicas se hace para el sulfato de aluminio, en la bodega central ubicada entre los tanques de almacenamiento de agua, y en la bodega auxiliar de la planta tres, recientemente construida.

El cloro líquido se almacena en un depósito abierto al lado de la zona de cloradores. En la bodega principal se almacenan también carbón activado y sales de fluor. Las condiciones de almacenamiento son apenas aceptables.

El carbón activado y las sales de fluor ya no se utilizan por lo que están en estado de abandono. El sulfato de aluminio no está ordenado por lotes según orden de llegada, siendo difícil distinguir entre un despacho y el otro. Esto hace que el consumo se haga en orden distinto al de llegada a la planta.

La recepción del sulfato la hace el operador en turno. El descargue no siempre se hace en la bodega principal, a pesar de esta tener capacidad suficiente. Es usual la práctica de almacenar sulfato en los patios adyacentes a los elevadores de carga. Aunque se cubre con un plástico

grueso no deja de estar sometido a los rigores de la interperie.

El almacenamiento de cilindros con cloro se hace junto a los que estan vacios. El control de existencias se lleva por el número de referencia del cilindro en una carta anual que muestra mes por mes la referencia de los cilindros recibidos y los que se han consumido.

El almacenamiento de repuestos y demás materiales para el mantenimiento se hace en la bodega del edificio de la planta tres. Se cuenta con un estante de madera para la colocación de los repuestos pequeños pero resulta insuficiente. Los demás repuestos y materiales no se colocan siguiendo un orden específico. Tampoco se lleva un control de existencias de los mismos.

La papelería de operación y algunas herramientas se guardan en la oficina del Jefe de operaciones y mantenimiento.

Los reactivos químicos de gasto lento, se almacenan dentro del laboratorio de control de calidad, en un estante de madera dispuesto para tal fin. El control de existencias de estos insumos esta a cargo del Jefe de Laboratorio.

El manejo de almacén de todos estos elementos lo hace el Departamento de Suministros de las Empresas Públicas. Es allí donde se clasifica en grupos y codifica cada uno de los insumos y se lleva su inventario. Para este fin todas las compras las hace este departamento y la dirección de la planta de tratamiento debe acusar periódicamente el recibo y consumo de materiales. La verificación real de inventarios por parte del Departamento de Suministros se hace anualmente, pero no les compete el manejo de los mismos dentro de la planta. En la planta de tratamiento se lleva un control específico sólo sobre algunos de estos materiales: Sulfato de aluminio, cloro, arena para filtros y antracita.

En cuanto al nivel mínimo de existencias de los materiales básicos para el tratamiento, este es fijado en el consumo de un mes de sulfato de aluminio y en el de 15 días para el cloro gaseoso. A Febrero 10 de 1990 se tenían en bodega 300 ton. de sulfato de aluminio. Esto es el consumo de las tres plantas durante 39 días considerando una dosificación promedio de 45 ppm a un caudal de 170.000 m<sup>3</sup>/d.

La compra del sulfato de aluminio se contrata por el término de un año, mediante licitación pública. El proveedor normalmente hace entregas de 200 ton. mensuales.

lo que garantiza la suficiencia de existencias. La planta de la firma que ha hecho las ventas en los últimos años se encuentra en Barranquilla.

En cuanto al cloro, este se le compra a Alcalis de Colombia, quienes lo despachan desde su planta en Betania, Zipaquirá. En promedio transcurren 20 días entre la fecha de pedido y la de entrega. El flujo de entregas es continuo. Cuando se han presentado demoras en la entrega y se acaba el cloro, se ha recurrido a solicitar en préstamo este producto en el sector industrial de Mamonal o se ha hecho la desinfección aplicando hipoclorito de sodio, que es de fácil consecución en la ciudad.

Al cabo de estas observaciones, se hacen las siguientes recomendaciones:

- Es necesario llevar en la planta un control de inventarios mediante el sistema perpetuo (kárdex) que bien podría ser llevado por el Jefe de operaciones. Así podrá consultarse en forma rápida el nivel de existencias tanto de productos químicos como de repuestos.

- Se hace necesario una mejor organización de las bodegas. En la bodega central es importante disponer los distintos materiales por separado, y en zonas asignadas para un

mismmo producto, debe también almacenarsele por lotes debidamente identificados por la secuencia de llegada e ir sacandolos para su consumo según este orden. Los diferentes lotes deberán estar distanciados mínimo 2 metros para permitir el tránsito de los operarios entre ellos.

En el almacén de repuestos deben proveerse los estantes para guardar los elementos allí guardados. Los repuestos deben ser clasificados y responder a un código interno que haga fácil el control de existencias, como la localización rápida del repuesto.

- La bodega para los cilindros de cloro debe hacersele un cerramiento con puerta de malla o de rejas metálicas que aisle de ésta zona a visitantes y extraños. Así mismo es urgente la instalación de un diferencial de más fácil maniobra para el movimiento de los cilindros de cloro.

- Debe gestionarse la compra de una volqueta o camión para el acarreo de sulfato de aluminio dentro de la planta.

- A corto plazo se recomienda coordinar el préstamo de un camión un día a la semana con el Departamento de Recolección, para que haga el acarreo interno de sulfato de aluminio.

- Debe producirse un informe mensual de cantidades consumidas y valorizadas para las tareas de mantenimiento y de control de calidad.

**6.5.3 Evaluación de la organización administrativa.** A la par con la organización y reglamentación administrativa de las Empresas Públicas, en la planta de tratamiento debe darse un orden administrativo que facilite la interrelación entre las actividades de mantenimiento y de operación.

Lo mínimo exigible es que cada quien dentro de la planta sepa cuales son sus deberes y responsabilidades y que estén bien definidos los trámites administrativos a seguir para la consecución de suministros, el envío de informes etc.

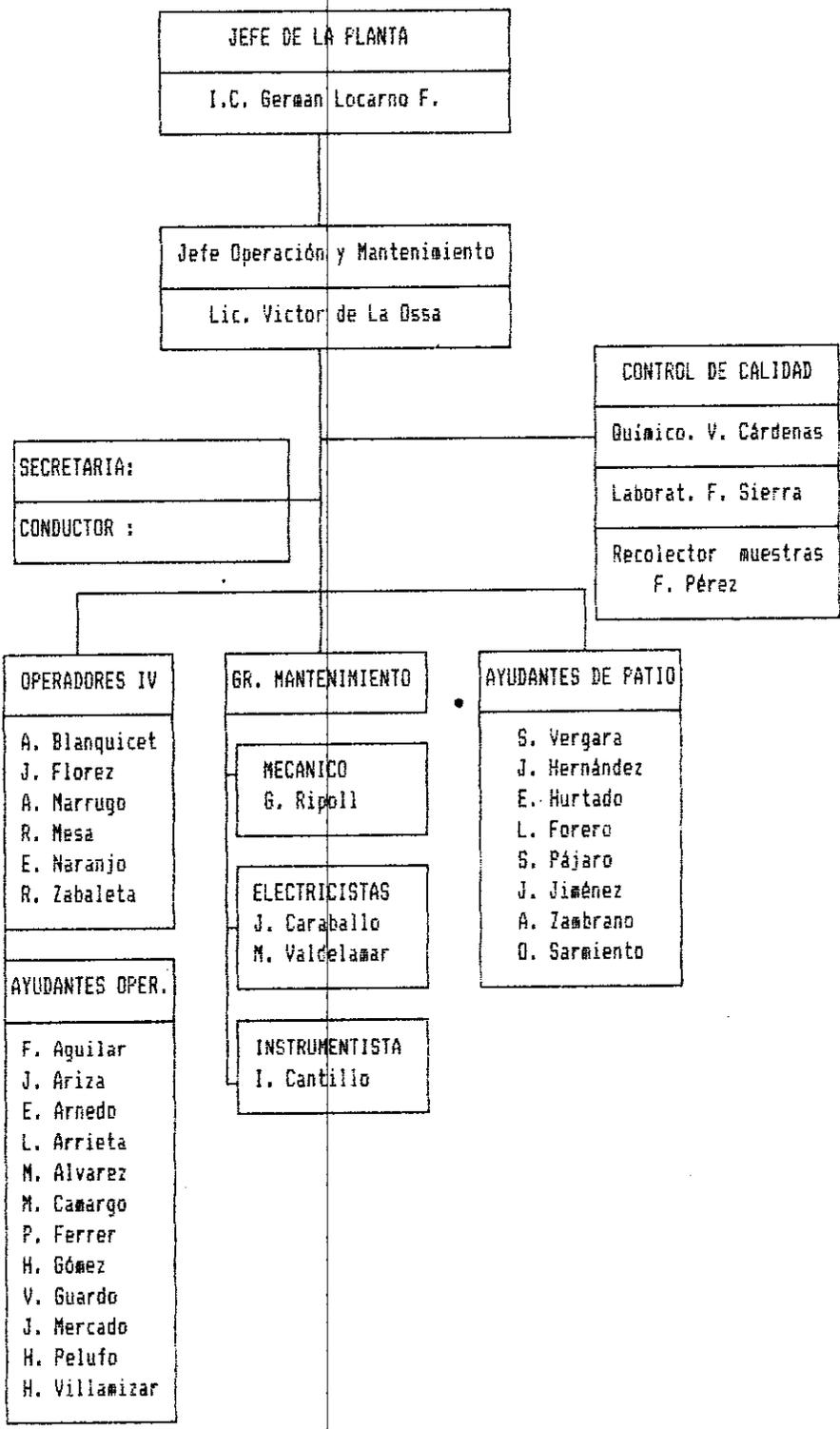
La primera condición la encontramos satisfecha con la existencia de un Manual de funciones que tienen las Empresas Públicas y que incluye al personal del departamento de Planta de Tratamiento. En el están definidos los distintos cargos, sus funciones y la jerarquía de los mismos. Es objetable sin embargo que los empleados de la planta no cuenten con volúmenes de consulta dentro de las instalaciones de la planta.

En la parte referente a trámites administrativos, encontramos que la parte de tratamiento tiene definidas las líneas de autoridad según el organigrama mostrado en la Figura 97.

En éste se nota y se dá en la realidad, que los ayudantes de patio tienen como jefe inmediato al Jefe de operación y mantenimiento. Resulta así una muy escasa supervisión del trabajo de estos, dadas las múltiples ocupaciones del jefe de operaciones y mantenimiento.

Los trámites ante otras dependencias de las Empresas Públicas estan centralizados en el Jefe de la Planta y en el Jefe de operación y mantenimiento, quienes conocen bien el organigrama de la empresa. No obstante no existe una referencia escrita que contenga flujogramas y reglamentaciones. Entre los procedimientos a describir estarían: la forma de presentar y lograr la aprobación del presupuesto de la planta; el cómo lograr tratamiento preferencial por parte del Departamento de Suministros en caso de requerirse materiales con urgencia; a quien dirigirse para requerir información sobre facturación del agua suministrada; y otros procedimientos de interrelación con las demás dependencias de la empresa e incluso con dependencias de otras empresas de servicios públicos.

FIGURA 97. Organigrama de la Planta de Tratamiento.



Para lograr un desempeño más armonioso dentro de la planta, se recomienda:

- Distribuir a los ayudantes de patio en dos grupos y que este cada grupo bajo la dirección del operador en turno, quien tendría como nueva responsabilidad el ordenar y supervisar las tareas correspondientes del día según la directiva recibida del Jefe de operación y mantenimiento.
- Redactar una guía en donde se detallen los diferentes trámites administrativos que se dan en la Planta. Así se evitarán traumatismos por ausencia o cambio del Jefe de la planta.

**6.5.4 De los servicios generales.** Se trata de estudiar los servicios complementarios que se brindan en la planta de tratamiento para hacer más eficiente el desempeño de sus trabajadores.

- Sistema de vigilancia. El cuidado de las instalaciones de la planta de tratamiento El Bosque está a cargo de un grupo de vigilantes que laboran en turnos de 12 horas. Ellos dependen del Departamento de Seguridad y Vigilancia de la Dirección Administrativa de las Empresas.

Estos vigilantes resultan insuficientes para cuidar el

extenso lote de la planta. Ante las continuas invasiones que estaban produciéndose, hubo necesidad de emprender el cercado de la planta. Estos trabajos están terminados en la parte que era de difícil control, con lo que la seguridad de la planta se ha visto fortalecida. Se tienen garitas elevadas desde donde los vigilantes dominan todas las instalaciones de la planta.

Los vigilantes tienen su puesto de trabajo en la caseta de la portería en la entrada principal y hacen rondas periódicas por las demás instalaciones. La entrada a la planta es restringida pero no se lleva un control riguroso del personal que entra a la planta.

El aspecto de presentación general de la planta de tratamiento es deficiente. Las vías internas son destapadas y mal conservadas. Las zonas verdes lucen descuidadas y el edificio de la planta No. 1, que es el que primero ve el visitante, tiene deteriorada la pintura.

La planta No. 3 y la zona de cafetería son las mejor cuidadas en cuanto a su presentación y aseo. Por el contrario los edificios de las plantas 1 y 2 lucen sin pintura y con ventanales semidestruidos. El aseo de pisos es encargado con alguna regularidad a uno de los ayudantes de patio, pero está muy descuidado.

Para el transporte del personal de la planta se cuenta actualmente con dos camionetas con las que se realiza la recolección de muestras en las redes urbanas, cuatro recorridos diarios para recoger y llevar el personal, y el desplazamiento del jefe de la planta a las distintas dependencias de las Empresas.

Estos vehículos ya llevan varios años en servicio presentado desperfectos mecánicos frecuentes. El arreglo en los talleres de la Empresa generalmente resulta demorado causándose retrasos en la recolección de muestras en la ciudad.

La planta no cuenta con un camión o volqueta que necesita para hacer el transporte del sulfato de aluminio desde la bodega hasta las zonas de dosificación. Actualmente este transporte se realiza en una de las camionetas, pero resulta una operación muy engorrosa por su poca capacidad de carga y antieconómica por el número de viajes a realizar.

Los servicios de comunicaciones con que cuenta la planta consisten en: Una línea telefónica en la oficina del jefe de la planta, con derivación en la mesa del operador de la planta uno; un sistema de citófono con cinco salidas: en las oficinas del jefe de la planta y del jefe de

operaciones, en el laboratorio de la planta No. 3, en el pasillo de operaciones de la planta No. 1 y en la portería de la entrada principal; un equipo de radio para comunicación con estaciones de captación, bombeo, dependencias de la empresa e ingenieros de la dirección operativa.

Otro de los servicios de la planta es la de la zona social conformada por un cajetin con mesa y sillas suficientes, con un área para cocinar y donde los trabajadores tienen organizada una cooperativa para la compra de gaseosas y alimentos ligeros.

Aunque los trabajadores prefieren cocinar sus alimentos, también cuentan con el servicio de restaurante que les ofrece la sede social de los trabajadores de las Empresas Públicas.

**Conclusiones y recomendaciones.** Se encontró que el nivel de los servicios generales en la planta de tratamiento es bueno, y que todos contribuyen a la formación de un muy acogedor ambiente de trabajo.

Se recomienda tomar las siguientes acciones para mejorarlos :

- Empezar un programa de embellecimiento de las fachadas

exteriores de las plantas No. 1 y 2. Estas, bien conservadas lucirán más vistosas y mejorarán la imagen de la planta.

- Intensificar las labores de cuidado de zonas verdes y jardines.
- Coordinar con el Departamento de vías de la Empresa la adecuación de las vías internas de la planta. Esta es de las necesidades más sentidas actualmente.
- Terminar el cerramiento de los predios de la planta de tratamiento.
- Llevar un control más estricto sobre el personal que entra a la planta, mediante la utilización de carnets para visitantes.
- Hacer la reposición de las ventanas faltantes en el edificio de las plantas No. 1 y 2.
- Gestionar la asignación de otra línea telefónica para facilitar la comunicación con el público.
- Se hace necesario contar con un nuevo vehículo destinado sólo a la recolección de muestras en la ciudad.

## 7.0 CONCLUSIONES

1. Las instalaciones de las plantas de tratamiento uno y dos, están siendo subutilizadas. Tratan un 45% de su capacidad nominal, estimada en 110.000 m<sup>3</sup>/día. Esta última aún podría incrementarse.
2. El sistema de aducción del acueducto de Cartagena, no suministra la cantidad de agua suficiente para que las tres plantas de tratamiento instaladas en el barrio Paraguay, trabajen con su capacidad nominal.
3. La eficiencia de la planta uno es muy superior a la de la planta dos, a pesar de ser más antigua.
4. Las estructuras de estas dos plantas se encuentran en buen estado de conservación. Solo presentan algunas grietas menores.
5. No existe un instrumento de medición de caudales a la llegada del agua a los tanques de compensación. Así mismo

no hay forma precisa de medir el caudal tratado en las plantas uno y dos, ni conjuntamente, ni por separado.

6. Existen instalaciones de pitometría, que pueden habilitarse para la medición continua de caudales.

7. El equipo de dosificación de sulfato instalado resulta insuficiente para la normal operación de las dos plantas.

8. El cuarto de alimentación de tolvas no ofrece las condiciones necesarias para el adecuado almacenamiento del sulfato de aluminio de consumo inmediato.

9. No existe la dotación de instrumentos necesarios para que los operadores puedan realizar los ensayos elementales de tratabilidad del agua.

10. El proceso de mezcla rápida que se da en la planta no es el más conveniente debido a los bajos gradientes de velocidad producidos y al tiempo excesivo de agitación.

11. El proceso de floculación es muy irregular. Deben ser revisadas las estructuras del floculador dos de la planta uno y del floculador de la planta dos, de acuerdo a un nuevo diseño acorde con el proceso de tratamiento seguido.

12. La operación de los sedimentadores se da sin ningún tipo de control, permitiéndose gran acumulación de lodos en los mismos, lo que varia la eficiencia de la unidad.

13. La estructura de entrada a los sedimentadores, para las condiciones del caudal de diseño, producen gradientes muy altos, rompiendose el floc. Las tres válvulas de diámetro 0,41 m resultan insuficientes.

14. La continua comunicación entre los canales distribuidores de agua a los sedimentadores, existente entre las dos plantas, ha ocasionado el descuido en la operación de la planta dos, pues la planta uno toma los caudales que deja de tratar la primera sin ningún problema.

15. La falta de los reguladores de caudal y el descuido en la operación del filtro durante las primeras horas de carrera, trae como consecuencia la inclusión de aire en el lecho. Esta a su vez degenera en la pérdida de material filtrante durante el lavado. Los filtros en su gran mayoría han perdido la capa de antracita.

16. No existen los elementos básicos para el control de proceso de filtración: hacen falta los medidores de caudal y de pérdida de carga.

17. Existen equipos en estado de total abandono: el indicador electrónico de caudales medidos en las distintas tuberías que salen de la planta hacia la red de distribución, el medidor vénturi de las plantas uno y dos, el sistema hidroneumático de la planta uno, y las instalaciones para lavado superficial de filtros.

18. Los residuales de cloro disponible medidos a la salida de la planta hacia la ciudad, resultan muy bajos. Deberían mantenerse bastante cercanos a un mg/l, para garantizar el mínimo de 0,1 mg/l en cualquier punto de la red. Además el tiempo de contacto del cloro con la masa de agua resulta muy corto, requiriéndose unas mayores dosis de cloro.

19. Al presentarse una falla eléctrica en las estaciones del sistema de aducción, es obligatoria la parada de la planta. El no tener conectado los equipos del sistema hidroneumático a la generación eléctrica de emergencia, causa que no se puedan cerrar las válvulas de los filtros, quedándose estos totalmente secos.

20. Los operadores no llevan un control adecuado de cada uno de los procesos de tratamiento. A pesar de esto la calidad del agua producida es confiable.

21. No existe un programa riguroso de mantenimiento preventivo, ni un manual de operación y mantenimiento.

22. La gestión administrativa realizada en la planta de tratamiento es buena, aunque hace falta más dinamismo para lograr que se apropien más recursos para la sustitución y modernización de equipos.

23. El control de calidad que lleva a cabo el laboratorio no es continuo, pues solo cubre los días hábiles. Además no existe un posicionamiento estratégico de los sitios de muestreo en la ciudad.

24. El número de muestras analizadas para el control bacteriológico del agua resulta inferior a las normalizadas en el decreto 2105/83.

25. El sistema de acueducto del que hacen parte estas plantas de tratamiento, es muy vulnerable, y la ausencia de un gran tanque de almacenamiento en la ciudad, hace que cualquier parada en la planta produzca de inmediato problemas de suministro.

8.0 RECOMENDACIONES

1. Las instalaciones de las plantas uno y dos, deben ser incorporadas al nuevo acueducto de Cartagena, optimizando los procesos de tratamiento, de forma tal que puedan trabajar como mínimo con el caudal de diseño, de aproximadamente, 110.000 m³/día, conjuntamente.

2. Debe estudiarse la introducción de las siguientes reformas a las unidades de procesos, así:

. Hacer la mezcla rápida con un retromezclador tipo turbina, como funcionó inicialmente esta unidad. Así se logran mayores gradientes de velocidad, un menor tiempo de agitación y no se requiere hacer modificaciones a la estructura de la cámara existente. Además ya existe en la planta la capacidad técnica y operacional para un debido manejo y mantenimiento de estos equipos.

. Habilitar de acuerdo a un diseño previo, los floculadores que antes fueron del tipo mecánico, para que funcionen en forma similar al de la planta uno.

. Modificar la zona de entrada a los sedimentadores para que no se produzcan gradientes de velocidad tan altos en los orificios de salida. Se propone que la salida sea mediante 5 orificios de diámetro 0,61 m, localizados en la pared y no en el fondo del canal.

3. Se recomienda tomar las siguientes acciones correctivas, para el buen funcionamiento de estructuras y equipos, así:

. Poner en funcionamiento el sistema de lavado superficial de los filtros.

. Dotar a cada filtro de los instrumentos de medida de caudal tratado y de pérdida de carga.

. Habilitar el vénturi existente para hacer la medición de caudal a tratar en estas plantas.

. Hacer reparar el equipo de medición de caudales que salen de la planta.

. Contratar las obras de mantenimiento de la cubierta de la planta uno, así como de las casetas de acceso a los tanques de almacenamiento.

. Contratar la reparación del puente o pasillo sobre el sedimentador tres de la planta uno. (S<sub>3</sub>-1).

4. Para que los operadores puedan realizar el debido control sobre los procesos de tratamiento, se requiere la dotación del laboratorio de la planta dos, por lo menos, con un equipo para el ensayo de jarras, un turbidímetro, comparadores de color y de residual de cloro.

5. Dirigir la acción del laboratorio de control de calidad a la ejecución del control después del tratamiento y hacia investigaciones afines a su competencia tanto dentro de la planta como en la red de distribución. Los ensayos de tratabilidad y el control de los procesos pueden delegarse en el operador y sus ayudantes.

6. Empezar una campaña de mejoras locativas y embellecimiento de las estructuras existentes.

7. Adelantar los diseños y construir uno o varios tanques de almacenamiento que garanticen el suministro continuo de agua durante el tiempo que se determine en promedio tarde la planta en superar una emergencia de corta duración.

## BIBLIOGRAFIA

- COLOMBIA. MINISTERIO DE SALUD. DIRECCION DE SANEAMIENTO AMBIENTAL. SECCION ACUEDUCTOS. Módulos de evaluación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua para consumo humano. Bogotá: El Ministerio, 1989. V. 1-17. Serie de documentos técnicos preparados en el Cepis. Organización Panamericana de la Salud.
- CONSUEGRA G., Alberto, ECHAVEZ J., Moises y SANTOS I., Luis. Evaluación de la planta de tratamiento No.3 del acueducto de Cartagena. Cartagena, 1983. 593 p. : il. Tesis (Ingenieros Civiles). Universidad de Cartagena. Facultad de Ingeniería Civil.
- DEPARTAMENTO DE SANIDAD DEL ESTADO DE NUEVA YORK. Manual de tratamiento de aguas. 1 ed. Nueva York: Limusa, 1964. 205 p. : il. ISBN 968-18-0463-5.
- SILVA G., Luis. Diseño de plantas de purificación de aguas. s.l. : s.n., 1987?. 158 p. : il.
- . Diseño de acueductos y alcantarillados. 10 ed. Bogotá : s.n., 1987. p. 132-142: il.
- PEREZ C., Rafael. El agua. Serie Arte de Construir. 2 ed. Bogotá : Escala, 1988. p. 26-32 : il. ISBN 9082.19.X.
- MATAIX, Claudio. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. México : Harper y Row, 1972. p. 33-43, 134-138, 199-212, 226-236 : il. ISBN 06-3155900.
- TALLER OPERACION Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS. ( ? : 1989 : Cartagena). Informe Final del Taller de Operación y Mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas. Cartagena : s.n., 1989. 3 v.
- HUEB, José. Pitometría. Lima : s.n., 1984. Manual DTIAPA No. C-8. Cepis.

en algunas unidades y en otras ésta apenas tiene una capa de unos pocos cm de espesor. Los ayudantes de operación tienen a su cargo el lavado de las paredes de dos de los filtros durante el turno. También deben hacer aseo de las mesas de operación y de la zona del dosificador.

En este proceso también se presenta la operación de las bombas de llenado del tanque de agua de lavado de filtros. Las bombas las acciona el operador desde su escritorio ubicado en la casa de filtros de la planta uno. Allí mismo tiene un indicador tipo reloj de la altura del agua en el depósito. La acción de llenado debe hacerse unas dos veces por día y el tiempo de bombeo aproximado es de 20 minutos.

**Desinfección.** La aplicación del cloro en solución acuosa se verifica en la cámara de cloración ubicada en la planta uno. El operador supervisa horariamente el dosificador de cloro, y el estado de las válvulas y conexiones. Debe hacer el cambio de cilindro cuando éste se acaba.

El control se hace tomando una muestra cada hora del agua tratada y determinándole cloro residual. Si este se encuentra por debajo de 1,0 ppm se dosifica un poco más. Este registro se apunta en al hoja de operaciones.

El operador debe además: llenar el libro de operaciones, donde detalla los eventos del día, número de las bombas en línea, hora de lavado de los filtros, sustancias químicas recibidas, bultos de sulfato consumidos, daños detectados. También llena dos formatos de operación: uno conteniendo los datos de números de bombas operando y los niveles del agua en las distintas estaciones, con datos que le transmiten por radio desde cada estación; y otro formato con información horaria sobre caudal tratado, dosis de sulfato y de cloro aplicado y residuales de cloro.

Cuando se programa el lavado de uno de los floculadores o un sedimentador, el trabajo se asigna por tarea a un grupo de 6 u 8 personas del personal de patio y mantenimiento.

Lo anterior es en términos generales la secuencia de operación normal en las plantas uno y dos. Debe hacerse la salvedad de que esta situación es en realidad deficitaria, pues las plantas uno y dos están diseñadas para trabajar cada una con un caudal de 55.000 m<sup>3</sup>/día.

**6.2.2 Evaluación del personal.** Se realizaron entrevistas con el fin de establecer su idoneidad para el desarrollo de sus funciones y obtener información adicional sobre la existencia de problemas no detectados por el evaluador y las soluciones que ellos han dado.

Las entrevistas se calificarán de acuerdo al procedimiento recomendado por SATECIA en su Manual sobre evaluación de desempeño en el trabajo. En el se asigna a los aspectos calificados un valor ponderado según el nivel de los cargos. La suma de estos valores de ponderación es 20 y la calificación de 1 a 5. Las tablas de calificación promedio por nivel de cargos es la siguiente:

- Cargos a nivel de supervisión. Aplicados a el ingeniero Jefe de la Planta, al Jefe de Operaciones y al Jefe de Laboratorio.

Factores	Valor Ponderado	Calificación	Puntajes
Cantidad de trabajo	3	4,0	12,0
Calidad de trabajo	5	4,2	21,0
Interés	3	4,0	12,0
Disciplina	2	4,6	9,2
Relaciones personales	2	4,1	8,2
Capacidad descriptiva	5	4,5	22,5
Totales			84,9

## - Nivel subalterno

Cargos				
Factores	Valor	Operador	Ayud. Oper.	Ayud. de patio
Cantidad de trabajo	5	3,6	3,2	4,0
Calidad de trabajo	5	4,0	4,0	4,0
Interés	4	3,6	4,0	3,5
Disciplina	3	4,5	4,0	4,0
Relaciones personales	3	4,5	4,5	4,0
Totales		79,4	77,5	78,0

Del análisis de estos totales, puede concluirse que:

- A nivel de supervisión el personal en la planta está muy bien preparado, tiene una experiencia amplia en temas de ingeniería sanitaria y son garantía para el buen desempeño de la planta de tratamiento.

Es de resaltar la dedicación al trabajo, la disponibilidad permanente para atender situaciones especiales y el buen ambiente de trabajo que crean a su alrededor.

- Los operadores son personas con muchos años de trabajo en la empresa así como de experiencia en sus actuales cargos. Se les nota poco interés al realizar sus

trabajos. Esto es causado por la falta de incentivos a su trabajo. Y es que su participación en el trabajo se ha visto disminuida en los últimos años debido al deterioro de los distintos equipos controladores en la planta y a que no se han habilitado otros en su reemplazo. Esta carencia de los recursos necesarios les ha ido quitando elementos de control de los diversos procesos.

En general su nivel de formación es bueno y se muestran muy receptivos a la modernización y actualización de los equipos.

Los ayudantes de operación conocen la teoría elemental de los distintos procesos, y se muestran motivados a seguir un programa de capacitación continuada en la medida en que puedan aplicar esos conocimientos. Sin embargo manifiestan poco interés en el desarrollo de sus actividades diarias.

**6.2.4 Evaluación de los procedimientos de control.** Una de las principales deficiencias encontradas es la carencia de los elementos necesarios para que el operador pueda realizar los procedimientos de control.

El operador no hace ensayos de jarras, ni monitorea turbiedades o calidad del flóculo producido. No tiene

idea de la repartición de caudales que se dan a los sedimentadores ni de los tiempos de retención de cada unidad de proceso. En cuanto a la filtración no tienen forma de registrar la pérdida de carga ni el caudal que filtra cada unidad.

Se recomienda elaborar un programa a largo plazo, de monitoreo de la operación de las plantas de tratamiento. Este programa tiene múltiples utilidades. Una de ellas es la de motivar el personal de operación a realizar rutinariamente los controles de proceso. El saber que la información que esta generando es valiosa y que en base al análisis de la misma podrá mejorarse la eficiencia de los distintos procesos les hará personas más eficientes en su trabajo.

Otras de las utilidades del programa propuesto es la consecución de un material de consulta que podrá emplear la empresa como fuente al hacerse necesario optimizar y ampliar las actuales estructuras. Para lo anterior es prioritario que se les dote el laboratorio por lo menos con los equipos de jarras, comparadores de color, y turbidímetro. Así mismo, que se les dirijan una serie de ensayos que les permita hacerse otra vez a las prácticas y exigirles que hagan por lo menos tres ensayos de jarras por turno.

También deben llevar una hoja de operaciones de cada unidad en un libro aparte que permanezca en el escritorio del operador, a fin de que puedan consultar en cualquier momento datos como última fecha de lavado, estado de los componentes de la unidad, dimensiones, etc.

Para los filtros se recomienda instalar piezómetros elementales, que no implican un mayor costo y si proveerán la forma de controlar la pérdida de carga. Entregar a los operadores formatos adecuados en donde puedan registrar la pérdida de carga y la turbiedad del afluente por lo menos cada dos horas. Indicarles la forma de graficar y analizar estos datos.

**6.2.5 Evaluación de los recursos complementarios.** Se encontró que los recursos complementarios existentes en la planta son adecuados pero no se encuentran a disposición para su uso. Se tiene una buena dotación de herramientas y demás útiles que los operadores pueden solicitar pero sólo en horas hábiles.

Es objetable que los únicos elementos con que estos cuentan para la operación son una llave de expansión y unos alicates. Tampoco cuentan con lámparas de mano, para superar emergencias por apagones, ni impermeables que les permitan maniobrar resguardados bajo la lluvia.

Por lo anterior se recomienda:

- Entregar a los operadores un juego de herramientas básicas que incluyan mínimo los siguientes elementos: Destornilladores de pala y estría tamaño mediano, llaves de tubos, llaves de expansión, alicates, martillo, pinzas aisladas, cintas aislante, linternas y pilas de repuesto.
  
- Dotarlos de impermeables y botas que les facilite realizar trabajos bajo la lluvia. Tener presente que con mucha frecuencia las situaciones especiales se presentan en medio de las fuertes lluvias.

**6.2.6 Evaluación de la supervisión.** La supervisión directa sobre las actividades de operación las realiza el jefe de la planta y el jefe de operaciones durante las horas hábiles.

Normalmente se reúnen al inicio de la jornada, el ingeniero jefe de la planta, el jefe de operaciones y los demás trabajadores, para informarse de las actividades a desarrollar durante el día. El Jefe de operaciones asigna las tareas al personal de patio, y supervisa periódicamente el desempeño de sus subalternos. Los trabajadores en general realizan sus tareas sin necesidad de que se les este inquiriendo por sus deberes.

Es notoria la falta de supervisión sobre las fechas en que deben lavarse las distintas unidades, pues no se incluyen en una programación regular. Esto conlleva a que se quede inoperante por largo tiempo alguna unidad, floculador o sedimentador, generalmente, por exceso de lodos depositados.

Se recomienda una supervisión más de cerca sobre los ayudantes de patio. Esta puede ser mejor ejercida por los operadores en turno.

6.2.7 Evaluación del manual de operación. Se trata de establecer como esta regulada dentro de la planta, la forma de hacer las cosas. De si existe un manual de operación y con que otros documentos es complementado.

Las plantas evaluadas no cuentan con un manual de operación completo. Se tienen una serie de normas y procedimientos generales para maniobras de los procesos pero no se encuentran disponibles para consulta de los trabajadores de la planta.

La carencia de un manual de operación se suple durante el entrenamiento de operadores con prácticas vigiladas durante un período de prueba en que el operador nuevo trabaja como ayudante de otro experimentado.

Se cuenta con un perfil genérico de los distintos cargos en la planta en el Manual de Funciones de las Empresas Públicas.

Otras ayudas para la operación lo conforman los catálogos e información técnica de equipos, pero la literatura existente en la planta es muy escasa. Los únicos catálogos encontrados corresponden al dosificador de sulfato de aluminio y al clorador nuevo de marca Wallace & Tierman.

En cuanto a la planoteca, en la planta no existe un juego completo y actualizado de planos de las estructuras existentes. Los que reposan en el archivo central de las empresas corresponden a los planos de construcción inicial de las plantas uno y dos, pero no existe registro de las modificaciones hechas posteriormente.

El archivo técnico existente en la planta está constituido por los diferentes formatos de operación, anotaciones diarias en el libro de operaciones, resúmenes semanales, mensuales y anuales.

El formato diario de operación y el formato de bombeo desde las bocatomas y estaciones se archiva empastado en volúmenes correspondientes a un año. Estos volúmenes se conservan en la planta al igual que los libros de

operación llevados por los operadores. Estos últimos son continuos pudiendo un sólo volumen contener datos de año y fracción.

El archivo guarda copia de los siguientes informes producidos: análisis bacteriológico diario, consumo semanal de sulfato y cloro, informe mensual de análisis físico-químico y bacteriológico, informe mensual de operaciones, resumen de niveles en las bocatomas, balance diario de agua en la planta, balance mensual de agua y registro de existencias de sustancias químicas.

También se archivan las órdenes de trabajo dadas a contratistas particulares, copia del acta de recibo de trabajos y de las cuentas de cobro. Se organizan en tres grupos a saber: Trabajos electromecánicos, obras civiles y trabajos especiales.

Otros documentos de archivo son:

- Correspondencia interna y externa de la planta.
- Copia de la correspondencia enviados a los departamentos de relaciones laborales y de suministros.
- Copia de correspondencia recibida de otras dependencias de las Empresas Públicas.
- Correspondencia cruzada con la Dirección Operativa de Acueductos y Alcantarillados.

La organización y codificación del archivo es independiente de la existente en el archivo central de las Empresas. La búsqueda de información en este es ágil pero no existe un paralelo de referencia donde se señale bajo que nomenclatura aparece clasificada la información de la planta en los archivos centrales.

Se recomienda mantener en el archivo documentación referente al estado de funcionamiento de cada uno de los equipos de la planta, estadísticas de mantenimiento y una relación completa de todos los documentos relacionados con la planta de tratamiento y que permanecen en el archivo central de las Empresas Públicas.

**6.2.8 Evaluación del balance de agua en la planta.** El objetivo es determinar si el balance de agua está teniendo alguna incidencia sobre la operación normal de la planta. Para ello se consultan los datos del balance diario, mensual y anual de las plantas 1 y 2 y se analiza el porcentaje de agua que se utiliza en la planta para los procesos y operaciones de la misma.

A continuación se presenta el resumen de los datos consignados en los formatos diarios de operación del mes de Febrero y el análisis de los mismos es como sigue:

398

Volumen de agua recibida para tratamiento en Febrero de 1990, por las plantas 1 y 2.

1'561.259 m<sup>3</sup>.

Volumen de agua gastada en las plantas 1 y 2 para el lavado de filtros en el mes.

38.600 m<sup>3</sup>.

Volumen gastado para lavado de otras estructuras en las plantas 1 y 2.

2.100 m<sup>3</sup>.

Volumen de agua producida por las plantas 1 y 2

1'520.559 m<sup>3</sup>

Así el agua consumida en las plantas 1 y 2 en el mes analizado corresponde al 2,61% del total recibida para tratar.

Si aceptamos que la planta uno produce el 65% del total conjunto tendríamos:

Volumen recibido en la planta 1:

1'014.813,5 m<sup>3</sup>

Volumen producido en la planta 1:

991.613,35 m<sup>3</sup>

399

Así el agua consumida 23.200 m<sup>3</sup> es el 2,35% de la que produce.

Para la planta dos:

Volumen recibido: 546.440,65 m<sup>3</sup>

Volumen producido: 528.940,65 m<sup>3</sup>

Volumen consumido: 17.500 m<sup>3</sup>

Este último valor es el 3,2% del agua recibida.

Un balance anual se estableció para el año de 1989, pero con los totales correspondientes al desempeño de las 3 plantas de tratamiento que constituyen la planta de filtros "El Bosque".

#### Balance de aguas de la Planta El Bosque. Año 1989

Volumen de agua a tratar: 56'107.680 m<sup>3</sup>.

Volumen de agua sedimentada usada para lavado: 536.700 m<sup>3</sup>

Volumen de agua filtrada usada para lavado: 1'593.180 m<sup>3</sup>

Volumen pérdida por reboses y fugas: 185.500 m<sup>3</sup>

Volumen total consumido en la planta "El Bosque": 2'315.380 m<sup>3</sup>

Volumen entregado para distribución: 53'786.130 m<sup>3</sup>

Así los consumos en la planta corresponden al  $((2'315.380/56'107.680) \times 100) = 4,13\%$  del volumen

400

recibido para tratar y el agua para lavado de filtros es el 2,88% (1'593.180/55'385.480)) del agua producida.

Las pérdidas por reboses y fugas son el 8% (185.500/2'315.380) del agua consumida en la planta y un 0,33% del agua producida.

**6.2.9 Evaluación de la operación de equipos especiales.** Se trata de establecer hasta que punto puede estar siendo afectada la operación normal de las plantas 1 y 2 al tener el operador que atender al funcionamiento de equipos no comunes y ajenos a los procesos de tratamiento. Entre estos equipos están: Estaciones de bombeo, subestaciones eléctricas, barrelodos, etc.

En las plantas 1 y 2 los equipos de operación especial son: La estación de bombas de la dársena, la estación de bombas de Blas de Lezo, y el motor diesel del generador de emergencia.

La operación de la estación de bombas de Blas de Lezo conformada por 2 bombas centrífugas de eje horizontal y de succión positiva, no es rutina que demande mayor esfuerzo al operador o a uno de sus ayudantes pues se limitan a prenderlas o a apagarlas si los niveles en los tanques bajaban mucho. Por falta de elementos no se hacen las mediciones sobre funcionamiento al prender estos equipos

ni se lleva un record de las horas de bombeo. La principal incomodidad está en la lejanía de la estación de bombeo a las instalaciones de la planta 1. Esta situación se vió superada a partir del mes de Enero de 1990, cuando se asignó un operador para estas bombas, quien depende del departamento de Estaciones de bombeo de la Empresa.

Las dos bombas localizadas en la dársena pueden ser accionadas desde la mesa de trabajo del operador en la planta uno. Tienen una señal luminosa que indica el estado de prendido o apagado de cada una de las bombas. Si los niveles en la dársena son muy bajos las bombas se apagan automáticamente.

El registro de las horas de bombeo se lleva parcialmente en el libro de operaciones, y se hace una inspección visual de su funcionamiento observando la descarga en el tanque de compensación desde la azotea de la planta No. 2. El operador tampoco controla las condiciones eléctricas y mecánicas de funcionamiento de estos equipos. En caso de detectar algún desperfecto el operador debe ir hasta la estación en la dársena, asegurar el equipo y reportar el daño a los mecánicos.

La operación de las bombas de la dársena no es un factor perturbante de la labor de operadores y ayudantes.

La operación del generador eléctrico es una rutina muy usual debido a los frecuentes cortes de energía en la planta de tratamiento. Esto obliga a una inspección diaria por parte de los encargados del mantenimiento quienes revisan el nivel de aceite de lubricación, posible fugas, etc. Así el operador y sus ayudantes deben sólo operar el mecanismo de arranque, inspeccionar con frecuencia su funcionamiento y hacer el llenado del combustible cuando la emergencia se prolonga por más de tres horas. El inconveniente que presenta es la gran cantidad de ruido que hace y la difícil evacuación de los gases de combustión.

#### 6.2.10 Evaluación de la operación eventual de la planta.

Se analizan aquí las operaciones que no son de común ocurrencia pero que implican un orden establecido de ejecución. Entre esas operaciones tenemos el parado de la planta, su iniciación y el lavado de estructuras como sedimentadores, tanques y otras.

El parado de la planta algunas veces obedece a una programación dada y en ocasiones debe hacerse por el no bombeo desde las distintas estaciones del sistema de aducción.

El orden correcto para parar las plantas 1 y 2 es el

siguiente:

- El ingeniero Jefe de la planta prepara el programa de actividades a realizar durante la parada. Asigna trabajos y ordena la preparación de los demás recursos necesarios. No siempre la parada programada obedece a la urgencia de hacer trabajos en seco en la planta pero podrá aprovecharse para actividades especiales de mantenimiento.
- El operador debidamente informado de la parada programada, deberá lavar los filtros y dejar llenar los tanques de distribución, cerrando las válvulas de salida a la red de distribución.
- Se cierra la entrada de agua cruda.
- Se suspende la filtración.
- Se apagan los dosificadores.
- Se apagan los demás equipos.
- Se procede a drenar la zona de trabajo si es necesario.
- Se ejecutan los trabajos necesarios a la menor brevedad posible.

Si la parada es imprevista, el operador una vez detecte la falla debe cerrar las salidas a la red, suspender la filtración y apagar los dosificadores. Con frecuencia ocurre que no se alcanza a parar la filtración antes de que los filtros queden totalmente secos, debido a que las válvulas son de accionamiento hidroneumático y coincide que la presión disponible en el equipo es muy baja.

De las entrevistas con los operadores y sus ayudantes pudo establecerse que estos conocen bien la secuencia de paradas de las plantas. Sin embargo no se tiene el cuidado de dejar todos los filtros limpios antes de hacer la parada programada. En parte esto se debe a que la programación no es conocida con suficiente antelación.

Durante la iniciación de la planta, la secuencia seguida por los operadores es:

- Restablecido el bombeo, abren la compuerta de entrada de agua a la planta.
- Inician la dosificación de sulfato de aluminio con la dosis que les indicaron según ensayo de jarras hecho en el laboratorio. Así mismo reanudan la cloración.
- Restablecen lentamente la distribución a la ciudad y se controla a intervalos entre 20 y 30 minutos los residuales de cloro producidos en el agua en los tanques. Se hacen los ajustes necesarios en el clorador hasta que se produzca un residual de 1 mg/l.

Aquí es importante hacer notar que los operadores no tienen los suficientes recursos para controlar la calidad del agua inicialmente producida, y es muy probable que durante los minutos iniciales la calidad de la misma difiera mucho de la normalmente producida.

La operación de lavado de sedimentadores es programada por el jefe de operaciones y por lo general se mantiene al margen de estas actividad al operador y sus ayudantes.

El día en que se va a lavar un sedimentador el jefe de operaciones asigna el trabajo por tarea a un grupo de 8 a 10 personas conformado por 2 técnicos de mantenimiento y los ayudantes de patio. La asignación por tarea significa que estas personas una vez concluyan el lavado del sedimentador pueden retirarse a descansar. Esta modalidad motiva al personal a trabajar con mayor eficiencia, reduciendo el tiempo de parada de la unidad.

El trabajo es supervisado directamente por el jefe de operaciones. El personal asignado ya tiene experiencia en el lavado de los sedimentadores y trabaja coordinadamente.

Las deficiencias observadas son:

- No se da aviso al operador de la programación hecha y se le mantiene al margen. El operador previamente informado puede aislar el sedimentador y abrir el drenaje oportunamente a fin de tener el sedimentador desocupado para la hora en que entre el personal que va a hacer el lavado.
- No se cepillan las paredes ni se les hace un tratamiento periódico para controlar el crecimiento de algas.

- El llenado del sedimentador se hace con agua flocculenta, siendo preferible que se hiciera con agua clarificada.

Otras observaciones referentes a operaciones eventuales son las siguientes:

- Las paradas imprevistas de la planta son aprovechadas para recuperar material filtrante depositado en el fondo de la cámara de desinfección o en el tanque de distribución.

- No se tiene una programación de fechas de lavado de flocculadores y sedimentadores. Algunas unidades presentaban muy reducida su eficiencia debido a la gran cantidad de lodos acumulados.

- La reducción del caudal de llegada a la planta implica una operación eventual, en la que debe controlarse la filtración a fin de que no queden secos los filtros. Sin embargo no se tiene este cuidado, y es frecuente encontrar unidades totalmente secas.

Se hacen las siguientes recomendaciones, afin de obtener una mejor respuesta ante las citadas operaciones eventuales a realizar en las plantas de tratamiento:

- Dotar a los operadores de turbidímetro y comparadores de color, para que puedan controlar la calidad del agua

producida regularmente y en períodos críticos como es el de iniciación de la planta, cambios de la calidad del agua a tratar o reducciones del caudal a tratar.

- Delegar las responsabilidades de supervisión del lavado de floculadores y sedimentadores en el operador de turno.

- Controlar el crecimiento de algas, tratando las paredes con una solución de sulfato de cobre u otro producto similar.

- Exigir que se haga el lavado con cepillo metálico de las paredes de floculadores y sedimentadores.

- Informar con antelación a los operadores y personal de mantenimiento de la programación de operaciones eventuales a ejecutar.

6.2.11. Evaluación de la operación de emergencia. La situación de emergencia se presenta cuando en forma imprevista factores de fuerza mayor interrumpen el normal desarrollo de los procesos de potabilización del agua. Puede deberse a fallas en el suministro de energía eléctrica, incendios, inundaciones cambios bruscos en la calidad del agua, terremotos, vientos huracanados, escapes de cloro, etc..

Se trata de establecer que tan preparadas estan las plantas uno y dos para enfrentar situaciones adversas del orden antes descrito.

**Fallas de energía eléctrica.** Por ser las unidades de proceso de estas plantas del tipo hidráulico el principal traumatismo originado por un corte de energía eléctrica se presenta en la dosificación de sulfato de aluminio y de cloro.

Para afrontar esta eventualidad se cuenta con una planta eléctrica auxiliar de 17,5 KVA. Esta suministra energía para accionar el motor de la bomba auxiliar de agua filtrada para los dosificadores y el motor del dosificador de sulfato de aluminio.

Tanto operadores como ayudantes conocen bien la secuencia a seguir ante esta emergencia. Se resume así:

- Presentada la falla eléctrica se apaga el motor del dosificador de sulfato.
- El operador y un ayudante prenden el generador y luego accionan el conmutador correspondiente.
- Prenden la bomba auxiliar para bombeo de agua a los dosificadores de cloro y sulfato de aluminio.
- Ajustan las válvulas de paso correspondientes y prenden el dosificador de sulfato de aluminio.

- Si se prolonga el apagón deberán hacer el llenado del tanque de ACPM del generador.

Esta secuencia es de común ocurrencia y supone una revisión diaria del generador por parte del personal de mantenimiento. Mientras dure la emergencia no se pueden lavar filtros ni otras estructuras por insuficiencia de energía para accionar la bomba del sistema hidroneumático. Por ser las válvulas de control hidroneumático y el rango de presión de este último muy bajo, resulta imposible suspender la filtración.

El principal inconveniente durante estas emergencias ha sido resultante de la carencia de recursos complementarios tan elementales como linternas ó velas y fósforos, así como una guía de instrucciones rápidas que le permitan resolver al operador una eventual falla menor de la planta de emergencia.

**Falla de estructuras y equipos.** Las fallas pueden ser avería de las tuberías de aducción o de una estructura dentro de la planta. La posible falla en una de las tuberías de llegada, es un evento que los operadores tienen siempre presente. Se mantienen en constante comunicación con las bocatomas y estaciones de bombeo de donde, les proporcionan datos como número de unidades en

línea y presión de descarga de las bombas. Así pueden detectar rápidamente cualquier falla al cotejar estos datos con los caudales de llegada a la planta.

De presentarse la falla llamarían a las estaciones de bombeo y pararían las plantas uno y dos. Si la reducción del caudal de llegada es muy severa, se pararía también la planta tres. Acto seguido darían aviso al Jefe de la planta y esperarían nueva orden.

En el caso de la falla de uno de los tanques los operadores coinciden en que aislarían la unidad y darían aviso al Jefe de la planta. La superación de estas emergencias en forma rápida dependerá de la diligencia mancomunada del Ingeniero Jefe de la planta y los demás departamentos y secciones de la Empresa. Por lo que se hace necesario prever las posibles fallas y para cada caso determinar quienes deben entrar a colaborar para solucionarlas.

La eventualidad de una emergencia en la planta por inundación es muy remota debido a su localización en una parte alta de la ciudad. Sin embargo la planta uno presenta problemas de drenaje en el interior de la galería de filtros. De presentarse un escape de agua en algunas de las válvulas allí alojadas, se inunda todo el piso y si no

es evacuado con baldes rápidamente, derrama sobre el semisótano donde se encuentran las bombas que llenan el tanque de agua para lavado de filtros. Por esto es urgente proveer una vía de evacuación de estas aguas.

El riesgo de un gran incendio es también poco probable debido a la ausencia de materiales inflamables. Para el caso de incendio en equipos, los operadores cuentan con extinguidores portátiles que les permitirán controlar el fuego. Así mismo la cercanía de una subestación del cuerpo de bomberos prevee una acción de ayuda rápida ante esta emergencia. No obstante es objetable la poca o casi nula frecuencia de realización de simulacros de incendio que adiestren al personal en control de incendios.

Ante la situación de emergencia por terremotos se admite que las acciones a seguir son muy disímiles dependiendo de los daños ocurridos en las diversas estructuras del acueducto. Hace falta preveer distintos grados de daños causados y la mejor forma de superarlos.

Respecto a la falla en la calidad del agua cruda esta sería detectada en un tiempo promedio máximo de una hora por los operadores. Este lapso corresponde al intervalo regular entre inspecciones generales a los distintos procesos de tratamiento que hace el operador o su ayudante.

La falla más probable es un aumento de la turbiedad. Si la emergencia se presenta en horas hábiles el operador aumenta la dosificación y ordena la recolección de muestras. Las envía al laboratorio donde se hacen los ensayos de jarras y le comunican la nueva dosis con la que hace los ajustes respectivos. Si no son horas hábiles el operador aumenta la dosificación por tanteos sucesivos.

Una emergencia por escapes de cloro, mientras sea leve puede ser superada por los operadores. Si el escape es severo, ante la carencia de máscaras adecuadas, deben limitarse a pedir la ayuda de los bomberos. Para la detección de escapes se utiliza el amoniaco.

En conclusión la operación de la planta en situaciones de emergencia es apenas aceptable. Las mayores deficiencias se presentan a nivel de los recursos complementarios.

A fin de contar con elementos que aseguren la superación de estas emergencias en la mejor forma posible, algunas de las recomendaciones ha tener en cuenta son:

- Elaborar unas guías escritas en las que se detalle la secuencia de acciones a seguir en caso de presentarse una de las emergencias mencionadas. Entregar copia

periodicamente a los operadores y ayudantes de operación y promover la discusión sobre los mismos, a fin de ir mejorandolos.

- Coordinar actividades de entrenamiento para casos de emergencia, y pedir asesoría a la Oficina Nacional de Emergencias, a fin de contar con información suficiente de como actuar en los primeros momentos después de un eventual movimiento telúrico u otro fenómeno natural que llegara a destruir las instalaciones del acueducto.

Esta información debe complementarse con un levantamiento topográfico de las inmediaciones de la planta de tratamiento, así como de la ruta de las tuberías de aducción.

- Programar con mayor regularidad jornadas de simulacro de incendios, escapes de cloro, fallas de energía y otras situaciones especiales a fin de garantizar un buen desempeño del personal en turno al presentarse una emergencia.

- Dotar al personal de las mascarillas y demás elementos necesarios para hacer frente a una eventual emergencia por escape de cloro y dejarlos situados en un lugar de rápido acceso.

### 6.3 EVALUACION DEL MANTENIMIENTO

Por mantenimiento entendemos todas aquellas acciones que se llevan a cabo para:

19. Asegurarnos de que los equipos y demás estructuras de la planta estan trabajando adecuadamente.
20. Corregir los daños que pueda presentar un equipo o estructura en un momento dado.

La primera definición se ajusta a la de mantenimiento preventivo y la segunda al mantenimiento correctivo o de reparaciones.

Es claro que la eficaz aplicación de un programa de mantenimiento derivará en beneficios tanto para la planta de tratamiento como para la entidad administradora, al poder prestar un mejor servicio con mayor eficiencia y a menores costos.

Específicamente el mantenimiento preventivo debidamente programado redundará en los siguientes beneficios:

- Reducción del tiempo de paradas forzosas de la planta o lo que es lo mismo, la prestación de un mejor servicio.
- Reducción de costos por mano de obra en mantenimiento, al no tener que hacerse reparaciones mayores.

- Prolongación de la vida útil de equipos, estructuras e instrumentos.
- Mayor eficiencia en el funcionamiento de los equipos e instalaciones.
- Un mejor seguimiento de los costos de producción, pudiendo detectarse con facilidad a que corresponden los más altos costos de mantenimiento y las causas de ello.
- Una mejor reacción ante situaciones de daños inesperados.
- Una seguridad adicional para trabajadores e instalaciones de la planta.

El beneficio específico de un mantenimiento correctivo será la puesta en funcionamiento del equipo dañado recuperándose el nivel de eficiencia que se tenía antes de presentarse el daño.

El mantenimiento correctivo casi siempre requiere mano de obra y recursos técnicos especiales que resulta oneroso tenerlos disponibles en la planta. Por esto es aconsejable contratar estos trabajos con talleres especializados, y poner un mayor énfasis en el mantenimiento preventivo en la planta de tratamiento.

El diseñar y poner en marcha un programa de mantenimiento preventivo comprende las siguientes etapas:

- Inventario técnico de las unidades de la planta, clasificación y codificación.
- Elaboración de unas Normas de Mantenimiento que establezcan los aspectos y procedimientos específicos a seguir por el personal de mantenimiento.
- La programación de las actividades de mantenimiento.
- La destinación de recursos tanto de personal como de materiales, herramientas e instrumentos de medida y elementos generales de mantenimiento.
- La instalación del programa, que consiste en la aplicación de los procedimientos normalizados a cada uno de los equipos y estructuras de la planta.
- El control directo del programa por el ingeniero a cargo del mantenimiento.
- El archivo de informaciones generadas por el programa.

Así, al querer evaluar el mantenimiento de las plantas de tratamiento se deben realizar las siguientes actividades:

- Evaluación de programas, manuales y estadísticas de mantenimiento.
- Evaluación del estado de los componentes de la planta.
- Evaluación de los recursos necesarios tanto humanos como materiales.

6.3.1 Evaluación de programas, manuales de mantenimiento y estadísticas. El propósito del estudio es establecer la eficiencia de los procedimientos que existen en la planta para diseñar, adoptar, desarrollar y controlar la programación del mantenimiento.

Se comparan los procedimientos de mantenimiento que se dan en la planta con los anteriormente definidos como necesarios para la ejecución de un programa de mantenimiento adecuado, según muestra la Tabla 108.

**TABLA 108.** Evaluación de los procedimientos para el mantenimiento. Plantas uno y dos.

EVALUACION DE LOS PROCEDIMIENTOS PARA EL MANTENIMIENTO DE LAS PLANTAS UNO Y DOS																	
MANTENIMIENTO PREVENTIVO														REPARACIONES			
Inventario de instalaciones y de equipos	Clasificación y codificación de equipos y estructuras		Calendario de mantenimiento		Normas de mantenimiento		Formatos para orden, ejecución y control		Archivo organizado		Estadísticas del mantenimiento		Son rápidas y oportunas		Se logra rápida contratación de servicios		
	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	
Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No
X		X			X		X		X	X			X		X	X	
<p>Análisis: El programa de mantenimiento preventivo esta en proceso de elaboración. Existe un inventario de equipos y estructuras. Incluso tienen una codificación definida. Se ejecutan muy parcialmente las tareas de mantenimiento preventivo.</p>																	

Actualmente se está trabajando a nivel de dirección de planta de tratamiento en el diseño de un programa de mantenimiento preventivo. Se tiene un inventario de equipos e incluso se abrió carpeta separada para algunos de ellos, pero no se logró tener continuidad en el registro de las tareas de mantenimiento realizadas.

Se siguen algunas rutinas de mantenimiento preventivo sobre válvulas, dosificadores, cloradores y motores, así como de limpieza de floculadores y sedimentadores. Pero estas no corresponden a una programación rigurosa del mantenimiento.

Las mediciones del funcionamiento de los equipos electromecánicos no es regular por la carencia de instrumentos adecuados. No obstante se hace evidente que para el personal de la planta el mantenimiento preventivo es de gran importancia.

Se concluye que no existe un programa de mantenimiento ajustado a las necesidades de la planta. Tampoco existe un manual de normas de mantenimiento y las rutinas ejecutadas obedecen a instrucciones transmitidas verbalmente por el jefe de operaciones a los técnicos correspondientes.

Se cuenta con escasa literatura sobre el mantenimiento de algunos de los equipos pero no está ordenada ni a disposición de los encargados del mantenimiento. En cuanto a las estadísticas de mantenimiento, estas no son llevadas regularmente ni con un orden establecido. Se lleva un registro diario de las acciones realizadas y se elabora un reporte mensual.

Se recomienda que el jefe de la planta asuma la responsabilidad de implementar en el mediano plazo un programa de mantenimiento preventivo acorde con la magnitud de las instalaciones de la planta.

**6.3.2 Estado de los componentes de la planta.** En las páginas siguientes se enumeran los aspectos evaluados y las condiciones encontradas para las diversas estructuras de la planta.

**Tanques de compensación.** Se hicieron las siguientes observaciones:

- Los tanques no cuentan con una baranda que los rodee ni con unas escalas que faciliten el acceso del operador hasta la plataforma donde estan las válvulas de salida.
- El control de malezas en los alrededores de los tanques no es regular, resultando inaccesibles algunas válvulas de las tuberías de llegada.

- No hay las estructuras de by-pass necesarias para permitir aislar los tanques para su lavado.
- Los tanques presentan gran cantidad de lodos por la falta de un lavado periódico.
- La limpieza y engrase de válvulas sólo se hace regularmente sobre las dos válvulas de las salidas. Las restantes por no ser operadas con frecuencia están descuidadas.
- La tubería de hierro fundido de llegada de agua de Dolores presenta desprendimiento de su recubrimiento.
- La cámara donde se reduce la tubería de entrada a las plantas uno y dos de 1,07 m a diámetro de 0,76 m, no tiene tapa.
- La iluminación de los tanques es deficiente.

#### **Tanque de agua de lavado de filtros.**

- No presenta la tapa de la cámara de acceso, implicando un riesgo por caída de visitantes, trabajadores y animales.
- No se tiene una frecuencia estipulada para su lavado.
- El sistema de arranque y parada automático de las bombas de llenado están fuera de servicio.
- Las escalas de acceso al tanque están deterioradas.

#### **Conducción a la mezcla rápida (tubería enterrada).**

- El registro por pitometría no se mantiene limpio.

- Existe un medidor vénturi que ha estado fuera de servicio por años. Las conexiones y válvulas están obstruidas. El fondo de la cámara presenta desaseo.
- La reja sobre la cámara donde está el vénturi presenta zonas de corrosión y no es pintada regularmente.
- La tubería después de la cámara fué descubierta para eliminar una derivación de diámetro 0,41 m que tiene pero el trabajo no se acometió y el hueco no se volvió a tapar, constituyendo un peligro de accidentes y desmejora de la imagen de las instalaciones.

#### **Cámara de mezcla rápida.**

- No se encontraron fugas ni roturas en el tanque de mezcla rápida. Hay señales de corrosión en la unión del tanque y el tubo que va al floculador hidráulico de la planta uno. Es un tanto deficiente la limpieza de paredes y piso superior. Presenta formación de algas en las paredes.
- La reja metálica que cubre la cámara y las barandas presentan un buen estado de pintura.
- Hace falta una de las compuertas que tapan las salidas de la mezcla rápida en caso de operacione especiales.
- Sobre la mezcla rápida se tiene un tanque de Eternit de 1.000 lts. para hacer la dosificación en caso de falla del dosificador, pero no tiene tapa y presenta desaseo. No es utilizado. Los operadores prefieren verter el sulfato de

aluminio directamente sobre la cámara de mezcla rápida.

#### Dosificador de sulfato de aluminio.

- El estado de pintura de esta unidad es regular.
- La estructura metálica sobre la que se apoya el dosificador, presenta corrosión.
- El funcionamiento del motor y el equipo en general es bueno. Presenta frecuentes daños en el sinfín, al permitirsele trabajar sucio.
- La tubería de PVC que evacua la solución de sulfato de aluminio, no está debidamente anclada, produciéndose el desensamble de la misma cuando se debe lavar con chorros de agua a presión.
- Los cables de la conexión eléctrica no están debidamente aislados.
- La plataforma donde está el tanque del dosificador es de difícil acceso y muy reducida para maniobrar en ella.
- El cuarto de llenado de la tolva del dosificador es abierto, desprotegido del efecto de la brisa, que por su situación en el altillo de la planta, es bastante fuerte. Esto hace que el sulfato de aluminio ya en la tolva, se vea sometido a drásticos cambios de humedad higroscópica, ocasionando la formación de terrones y la obstrucción del dosificador.

**Floculadores.** El estado general de mantenimiento de los floculadores es aceptable. No obstante se encontraron

las siguientes fallas:

- No existe una programación para el lavado de los floculadores.
- Las tablas superiores de los retardadores de madera están carcomidas por lo que es necesario su reemplazo. En algunas zonas ya permiten el flujo directo por encima del retardador superior.
- El aspecto de limpieza de muros se ve deteriorado por la práctica de los ayudantes de operación de lanzar sobre el floculador los terreros de sulfato de aluminio que encuentran al llenar las tolvas.
- Las paredes permanecen cubiertas de algas por lo que se hace necesario un tratamiento especial de las mismas.
- Las natas sobrenadantes son muy abundantes en el floculador uno de la planta uno y en el de la planta dos.
- Las válvulas de fondo presentan puntos de corrosión en el vástago.

**Canales de distribución a los floculadores y comunicación entre las plantas.** El nivel de mantenimiento que presenta esta estructura es bueno. El canal cuenta con las tapas en las zonas de acceso y el tubo entre las plantas uno y dos es pintado regularmente. No obstante se hace necesario programar una limpieza del canal pues presenta acumulación de sedimentos.

Se detectaron también pequeñas fugas en el empate entre el tubo de 1,14 m de diámetro y los canales. Así mismo hace falta una reja en la cubierta del canal frente a la salida del floculador de la planta dos.

El estado de pintura de los pasamanos es aceptable. No obstante se encontró una zona donde el tubo de la baranda está destruido por la corrosión. Los cables eléctricos de la iluminación están muy bajos.

**Sedimentación.** La estructura de los tanques de sedimentación de la planta dos no presenta grietas ni fugas. El nivel de conservación de las válvulas es apenas aceptable. Las válvulas de salida del sedimentador S<sub>1-2</sub> presentan corrosión. No se les hace mantenimiento.

En los canales recolectores del agua sedimentada es continua la formación de algas exigiendo una limpieza más frecuente de parte de los ayudantes de operación. En los tanques sedimentadores de la planta uno se presentan grietas y fugas en las paredes internas aunque no son muy prominentes. Algunas de ellas ya han sido curadas.

En el pasillo del sedimentador S<sub>3-1</sub> hay una rotura de la viga que resulta en una grieta y desnivel de 4 cm en el piso del pasillo. Al parecer la causa es un asentamiento

diferencial en la columna intermedia. Amerita ya una acción correctiva.

El estado de conservación y pintura de las barandas es bueno.

Las compuertas de salida estan corroidas y presentan fugas. No se les hace un mantenimiento preventivo.

**Filtros.** Son de las estructuras mejor conservadas de la planta, su presentación es buena y están siendo pintadas regularmente. Las situaciones observadas son:

- Las barandas están pintadas y no presentan corrosión.
- El aspecto general de aseo de pisos y paredes es muy bueno.
- Las canaletas del agua de lavado presentan múltiples puntos de corrosión.
- La iluminación en algunas zonas es deficiente por estar algunas lámparas fuera de servicio. Estas zonas son la parte extrema de la galería de filtros en la planta uno y sobre los filtros de la planta dos.
- Algunas válvulas presentan fugas.
- El estado de las válvulas de compuerta del afluente a cada filtro es delicado. Presentan bastante corrosión en las guías de la compuerta. Durante el período de esta evaluación, se daño la válvula del afluente al filtro F2-2

de la planta dos, imposibilitandose la limpieza del filtro, obligando a sacarlo de servicio.

- No existe una programación sobre fechas para inspección de válvulas.
- La galería de filtros de la planta uno no tiene desagüe por lo que se inunda con frecuencia.
- La reparación del lecho filtrante no se realiza dentro de unos períodos determinados.
- No se justifica el nulo mantenimiento que se le hace a los equipos e instalaciones dispuestos para el lavado superficial del lecho filtrante. Se limitan a pintura general, pero no se les hace pruebas periódicas de funcionamiento.

#### **Cloradores y cámara de desinfección.**

- Las instalaciones de dosificación de cloro fueron remodeladas recientemente. Se cambiaron las tuberías metálicas corroidas por tuberías de PVC. No se detectaron escapes de agua ni evidencia de sobrepresiones en el suministro de cloro.
- No existen las puertas que aislen la zona de cloradores de personas ajenas a su operación.
- La zona de almacenamiento presenta facilidades para cargue y descargue. La grúa manual se encuentra debidamente pintada y engrasada.
- Estas instalaciones están recién pintadas.

- En la cámara de aplicación del cloro se evidencia la falta de regularidad en el aseo de pisos y paredes.

**Hidroneumático.** El motor y compresor se encuentran localizados en un salón amplio, bien presentado y bien iluminado. Actualmente tiene un sólo motor para la bomba requiriendose otro de reserva para asegurar su confiabilidad. El tanque del hidroneumático está en buenas condiciones de pintura aunque presenta algunos puntos de corrosión. El estado de pintura de tuberías y válvulas es bueno.

El funcionamiento del hidroneumático es bueno aunque a la bomba se le dañan con frecuencia las balineras. Al parecer se debe a una defectuosa reparación cuando hubo necesidad de mandar a rectificar el motor.

En la planta uno existe un sistema hidroneumático de menor capacidad al actualmente en servicio. El estado de sus partes: tanque, motor y bomba es bueno exteriormente. Está debidamente pintado pero no pudo verificarse su funcionamiento. Ha estado parado desde hace aproximadamente seis años.

**Bombas para llenado del tanque de agua de lavado.** Se encuentran funcionando bien. Normalmente se prende sólo una y la otra permanece en reserva. Su estado de pintura

es aceptable.

- Es deficiente el desagüe del foso en donde se encuentran ubicadas, así como la iluminación.
- Las tuberías y válvulas están en buen estado y son pintados regularmente.

**Generador eléctrico de emergencia.** Ha estado trabajando satisfactoriamente durante los apagones. La frecuencia de estos ha obligado a estar haciéndole los chequeos de rigor diariamente.

Estaba presentando problemas por exceso de vibraciones y la concentración en el recinto donde se encuentra, de los gases de combustión. Recientemente se le cambió de ubicación, construyéndole una nueva base de anclaje. Se eliminó el problema por vibraciones y mejoró en parte la salida de gases de combustión. Presenta las conexiones eléctricas a la vista sin el debido aislamiento.

**Bombas auxiliares para alimentación de dosificadores y cloradores con agua filtrada.** Son dos bombas pequeñas, una con motor eléctrico y la otra a gasolina. El estado de conservación de estos equipos es aceptable. El motor eléctrico ha sido reparado y las tuberías han presentado daños por el mal anclaje de las mismas.

El motor a gasolina ocasiona a los operadores mucho

problema para su encendido y produce mucho ruido.

**Tanques de almacenamiento de agua tratada.** Los tanques de distribución No. 1 y 2 datan su construcción de aproximadamente 50 y 30 años respectivamente. El estado de sus estructuras es bueno y no se han detectado fugas. Lucen descuidados los accesos a los mismos.

- En la caseta de entrada al tanque No. 1 se observó que le hacen falta persianas laterales prefiriendo los operadores entrar por allí y no por la puerta. Dentro de la caseta, el aspecto es de desaseo.

- La válvula de la entrada al tanque 1 presenta corrosión así como la estructura metálica dispuesta para el controlador del nivel de agua dentro del tanque.

- La regla colocada para medir los niveles está manchada lo que dificulta las lecturas.

- En la caseta del tanque No. 2 la iluminación es deficiente y es muy difícil que el operador lea el nivel del agua dentro del tanque debido a lo estrecha de la cámara de acceso. El borde metálico de esta abertura está oxidada.

- La caseta sobre la estructura de rebose de este tanque no presenta puerta y se encuentra en estado de abandono.

**Montacargas y piso de depósito de químicos.** El montacargas de la planta uno está funcionando normalmente aunque le

falta una guía a los cables del mismo.

- El estado de conservación del motor y partes metálicas es aceptable.
- El cuarto donde se alimenta la tolva del dosificador y se almacena sulfato de aluminio se encuentra en precarias condiciones. Los ventanales estan corroidos y no tienen los vidrios. El techo presenta múltiples góteras. Esto resulta en condiciones desfavorables para la operación y el depósito de químicos en tiempo de invierno. El nivel de iluminación también es deficiente.

**Bombas de darsena de recirculación.** La estación de bombeo en la darsena se encuentra en condiciones buenas de mantenimiento.

**Transformadores.** Se encuentran debidamente aislados por una malla de seguridad, en las instalaciones de la planta tres. No todo el cableado está instalado en tubería conduit.

**Tableros de control.** Se encuentran identificados y pintados. Algunos de los instrumentos de medida (voltímetros y amperímetros) están fuera de servicio. Hace falta una señalización de los circuitos controlados por cada interruptor.

De las anteriores observaciones a las estructuras y equipos componentes de las plantas uno y dos concluimos que el estado actual de los mismos es apenas aceptable.

Se recomienda tomar las siguientes acciones correctivas:

- Responsabilizar al operador en turno y supervisar que no se descuiden las tareas de aseo en : Floculadores, cámaras de pitometría y del vénturi, cámara de desinfección y paredes de sedimentadores.
- Reponer las luminarias dañadas tanto exteriores como interiores.
- Contratar el curado de las grietas en los sedimentadores y la reparación del pasillo en el sedimentador S3-3.
- Reemplazar las tablas podridas en los retardadores de madera del floculador.
- Programar el mantenimiento de las válvulas de compuerta en sedimentadores y filtros que comprenda rectificación de guías, pintura y control de escapes del sistema hidroneumático.
- Revisar el sistema hidroneumático, los dispositivos de control automático de bombas y motores.
- Revisar el estado de funcionamiento del sistema de lavado superficial de filtros.
- Dotar de guardas de acople a las bombas de agua de lavado.
- Hacer el cerramiento del cuarto de cloradores.

- Habilitar las ventanas del cuarto de alimentación de tolvas.
- Contratar la impermeabilización del techo de la planta 1
- Hacer las reparaciones en puertas y ventanas de las casetas de acceso a los tanques de distribución.
- Revisar periódicamente el sistema hidroneumático de la planta uno para que pueda operarse ante la eventual falla del que actualmente funciona.

**6.3.3 Recursos necesarios para el mantenimiento.** El propósito de las entrevistas e inspecciones realizadas es establecer si se cuenta con los recursos humanos y materiales suficientes para la programación y desarrollo de las labores de mantenimiento.

**6.3.3.1 Recursos Humanos.** La evaluación cubre al personal encargado del ordenamiento, ejecución, supervisión y control del mantenimiento de la planta, analizando si es el necesario, su idoneidad y las posibilidades de capacitación con que cuentan.

- Existencia del personal necesario

Las actividades de mantenimiento de las tres plantas del Acueducto de Cartagena estan a cargo de las siguientes personas:

A nivel de ordenación, supervisión y control

- Jefe de planta (Ingeniero Civil)
- Jefe de operación y mantenimiento.

Ejecución a nivel de Técnico

- 1 técnico electromecánico
- 1 técnico electricista
- 1 técnico mecánico
- 1 ayudante de instrumentación

Ejecución a nivel de operador (por turno)

- 2 operadores
- 4 ayudantes de operación

Con esta nómina de personal pueden llevarse a cabo las rutinas de mantenimiento preventivo, siempre que se hagan según una programación.

- De la capacidad del personal

Evaluación del Jefe de la Planta

Título : Ingeniero Civil

Cursos de capacitación: Transferencia de calor.

Tratamiento de aguas.

Desinfección.

Operación y mantenimiento de

Plantas de tratamiento.

Años de experiencia : 17

Opinion sobre el mantenimiento: Sabe de los beneficios que le reportará un mantenimiento preventivo; manifiesta interés en perfeccionar el programa que lleva.

Trabajos de mantenimiento realizados: Supervisión de reparaciones en equipos electromecánicos y obras civiles.

Está capacitado para cumplir las funciones de ordenamiento, supervisión, control, estadísticas y evaluación de programas de mantenimiento.

Es posible que se le escapen algunos detalles en la supervisión de aspectos electromecánicos y electrónico.

Se concluye que el Ingeniero Jefe de la planta esta muy bien informado y capacitado para hacer el diseño, la ordenación la supervisión de un programa de mantenimiento preventivo.

- Evaluación del Jefe de operación y mantenimiento

Título: Tecnólogo en tratamiento de aguas.

Otros cursos de capacitación:

Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento.

Años de experiencia: 6

Resceptibilidad hacia el mantenimiento preventivo: Sabe de la gran importancia y no le disgustaría asumir más responsabilidades en su ejecución.

Trabajos de mantenimiento realizados: Supervisión de desmonte, reparación e instalación de equipos dosificadores y válvulas.

Se concluye que es persona idónea para dirigir la operación de la planta así como el mantenimiento preventivo o nivel de supervisión con cierta limitación en los aspectos electromecánicos.

Se recomienda programar cursos de capacitación en estos temas, tanto para el jefe de operaciones como para los mecánicos.

- Evaluación de los técnicos.

La ejecución de las labores de mantenimiento está a cargo de tres técnicos electricistas y un instrumentista. Todos son egresados del SENA y tienen ya varios años de experiencia en la Planta de tratamiento.

Por trámites administrativos sólo dos de ellos aparecen nombrados para el cargo de Mecánico II, y los otros dos tienen cargos distintos al que desempeñan. Los cuatro trabajan en conjunto aunque se dan entre ellos, cuatro especialidades a saber:

- Mecánico

- Electromecánico
- Electricista
- Instrumentista

Entre los trabajos por ellos realizados pueden citarse:

- Revisión de motores: Medición del aislamiento, desmonte, secado, cambio de aceite, medición de corriente y voltaje de funcionamiento.
- Trabajos eléctricos, revisión de protecciones, alambrado para instalación de nuevos aparatos, cambio de fotoceldas.
- Cambio de galletas o válvulas, de balineras a bombas, cambio de empaques, etc.

En cuanto a sus expectativas sobre trabajar según una programación dada del mantenimiento preventivo se muestran muy motivados a asumir las funciones que les correspondan, pero esperan se les suministre más elementos de trabajo.

Se concluye que el personal de técnicos de mantenimiento con que cuenta la planta de tratamiento es calificado para llevar a cabo las acciones preventivas que aseguran el buen funcionamiento de equipos y estructuras.

- Evaluación de los operadores.

Los tres operadores de las plantas uno y dos son personas que tienen 15, 15 y 5 años de experiencia en sus cargos.

Siempre han tenido responsabilidad en el mantenimiento de las estructuras y equipos que manejan, pero debido a la carencia de recursos complementarios han visto limitada su acción.

Las actividades de mantenimiento que realizan normalmente son el lavado de algunas estructuras y la inspección del funcionamiento de dosificadores y cloradores. No llevan control de horas de operación de los equipos ni de las mediciones de funcionamiento de las mismas.

Se recomienda dictar charlas a los técnicos de mantenimiento y a los operadores sobre la importancia del mantenimiento preventivo. Esto contribuirá a que cumplan con más celeridad sus responsabilidades correspondientes en el mismo.

**6.3.3.2 Recursos materiales.** La capacidad operativa de las personas encargadas del mantenimiento preventivo depende en alto grado de que tengan los elementos necesarios para realizar las distintas tareas asignadas.

Se estudió la existencia de instrumentos y herramientas, el banco de repuestos, las características del taller y los procedimientos de contratación de trabajos con personal ajeno a la planta.

Los instrumentos de medida con que se cuenta son: Voltímetro, amperímetro, megohmímetro, marcador eléctrico. Falta el comparador de carátula, el medidor de vibraciones, y el tacómetro.

Herramientas disponibles: Llaves, destornilladores, alicates, martillos, seguetas, aceiteras, graseras, cortafrio, guantes de alta tensión.

Repuestos en bodega: Rodamientos, sellos, tuercas, tornillos, fusibles, rodetes.

El taller ubicado en el edificio de la planta tres es la zona regular de trabajo de los empleados de mantenimiento. En el se guardan las herramientas antes citadas y cuenta además con las siguientes: Mesa de trabajo, prensas, equipo de soldadura menor, compresor, pistola para pintar, pulidora, taladro eléctrico, diferencial de 1/2 tonelada.

Los trabajos allí realizados son el desmonte, secado y armado de motores, hechura de piezas pequeñas y adaptaciones, pintura de equipos, arreglo de válvulas, cambio de sellos, y otros trabajos menores.

Para la ejecución de trabajos de mantenimiento con personal ajeno a la planta el Jefe de la planta puede

solicitar el servicio a contratistas y talleres particulares con previa autorización de la Gerencia de las Empresas Públicas.

El contrato en mención lo suscribe la Gerencia pero es el Jefe de la planta en últimas el encargado de fijar las especificaciones del trabajo a realizar así como oficializar el recibo a conformidad del mismo.

En cuanto a obras civiles siempre se reciben distintas ofertas. Para trabajos electromecánico, se contratan con el Taller San Judas, por ser de los más completos de la ciudad. Las plazos de entrega de estos trabajos están en promedio entre 20 y 30 días.

Otro aspecto deficiente encontrado respecto a los recursos materiales disponibles para el mantenimiento, es la demora del trámite de adquisición de repuestos y otros materiales. Normalmente se debe enviar el vale de solicitud al Departamento de Suministros o Almacén central de las Empresas Públicas. Allí, por falta de presupuesto o por los engorrosos trámites que deben cumplirse para una orden de pago, siempre se demora el suministro del repuesto requerido.

Conclusiones sobre el mantenimiento. De las observaciones hechas para cada uno de los aspectos evaluados podemos resumir que:

- Falta la capacitación continua del personal de mantenimiento.
- No existen los recursos suficientes para el buen mantenimiento de la planta.
- No existe el programa de mantenimiento preventivo debidamente implementado lo cual se evidencia en la carencia de controles y estadísticas de mantenimiento.
- Ha faltado diligencia por años para contratar la reparación de los equipos medidores de caudal.

Se recomienda que para corregir estas deficiencias se adopten las siguientes medidas:

- Implantar un programa de mantenimiento preventivo tanto para equipos como para estructuras.
- Involucrar al personal de mantenimiento y operaciones en las tareas preliminares al diseño y programación del mantenimiento, a fin de motivarlos sobre la necesidad y

los beneficios del mismo.

- Adoptar un manual de normas de mantenimiento preventivo completo, donde se detallen todas las acciones a seguir. Este deberá ser ampliamente conocido por los responsables del mantenimiento y tenerlo siempre disponible para su consulta.
- Llevar un control directo por parte del Jefe de la planta de las acciones de mantenimiento realizadas, entregandoles la programación u órdenes de trabajo por escrito y exigiendo los respectivos informes.
- Capacitar al Jefe de operaciones y mantenimiento en supervisión de trabajos electromecánicos.
- Organizar un curso sobre mantenimiento preventivo dirigido a técnicos y operadores.
- Mantener en la planta un fondo de repuestos más completo en diversidad y cantidad de repuestos.
- Habilitar los equipos de lavado superficial de filtros e hidroneumático de la planta uno. Establecer su grado de operabilidad y hacer los ensayos correspondientes para establecer si se requieren. En caso contrario, removerlos.

### 6.4 EVALUACION DEL CONTROL DE CALIDAD

El departamento o sección de control de la calidad del producto elaborado siempre es el más estimado en una empresa de bienes de consumo a fin de mantener su grado de aceptación dentro de los gustos del usuario. En las plantas de tratamiento, además de este factor, prima el hecho fundamental de tener la responsabilidad de la protección de la salud pública.

Esto hace que el control realizado deba ser casi perfecto. No debe permitirse la distribución a la comunidad de agua que no sea apta para el consumo humano. E incluso siendo ya potable el agua producida, no deben existir variaciones marcadas en el tiempo en sus principales características.

A nivel de la planta de tratamiento, el control de calidad es efectuado por el grupo de laboratorio, conformado por un profesional de Química y Farmacia asistido por un licenciado en química. Ellos tienen la responsabilidad de monitorear constantemente la calidad del agua producida, tanto a la salida de la planta, como en sitios distintos sobre la red de distribución en la ciudad.

Este control implica inicialmente el haber adoptado unos patrones de calidad de agua. En la planta de tratamiento

de aguas El Bosque, estos patrones son los contemplados en el Decreto 2105 de 1983, y que se resumen en el formato de informe mensual de análisis físico químico de aguas en proceso, que aparece reproducido en la página siguiente. Igual norma se sigue para el control bacteriológico del agua producida.

El control de la calidad del agua es realizado en el laboratorio de la planta tres, pues en las plantas uno y dos, aunque existe la locación esta no ha sido dotada y es usada como una bodega más.

Al evaluar debemos considerar: 1) procedimientos de control; 2) las estadísticas de calidad de agua; 3) la disposición de recursos.

**6.4.1 Procedimientos de control.** Diariamente se realizan, inicialmente, los ensayos correspondientes a tratabilidad del agua de la planta tres, y luego si se procede al control de las muestras tomadas en las distintas unidades y en la red pública.

Los ensayos realizados son turbidez, color, sabor, potencial de hidrógeno, alcalinidad, dureza, cloruros y sólidos totales. Para el agua tratada se determina además el cloro residual y se hace el análisis bacteriológico.

EMPRESAS PUBLICAS MUNICIPALES DE CARTAGENA  
PLANTA DE TRATAMIENTO

500

LABORATORIO

INFORME MENSUAL DE ANALISIS FISICO QUIMICO  
DE AGUAS EN PROCESO

FECHA:

"CARACTERISTICAS GENERALES"

ANALISIS	UNI.	CRUDA	DECANTADA	FILTRADA	TRATADA	M.S.P.Vr ADMISIBL
COLOR	U.C					15
OLOR	U.O					0
SABOR	U.S					0
pH	U.pH					6.5-9.0
TURBIEDAD	U.T					5
ALCALINIDAD FENOL (CaCO <sub>3</sub> )	mg/L					
ALCALINIDAD TOTAL (CaCO <sub>3</sub> )	mg/L					
ACIDEZ	mg/L					
DUREZA TOTAL (CaCO <sub>3</sub> )	mg/L					30-150
DUREZA DE CALCIO (CaCO <sub>3</sub> )	mg/L					
CALCIO (Ca)	mg/L					75
MAGNESIO (Mg)	mg/L					36
ALUMINIO (AL)	mg/L					0.2
HIERRÓ TOTAL (Fe)	mg/L					0.3
COBRE (Cu)	mg/L					1.0
CIANURO (CN)	mg/L					0.1
CROMO HEXAVALENTE (Cr <sup>+6</sup> )	mg/L					0.05
BARIO (Ba)	mg/L					1.0
ARSENICO (As)	mg/L					0.05
MERCURIO (Hg)	mg/L					0.001
PLATA (Ag)	mg/L					0.05
PLOMO (Pb)	mg/L					0.05
SELENIO (Se)	mg/L					0.01
CADMIO (Cd)	mg/L					0.005
FLUORURO	mg/L					0.8
CLORUROS	mg/L					250

Número más probable (N.M.P) de bacterias coliformes por 100 ml.  
 PARA VARIAS COMBINACIONES DE RESULTADOS POSITIVOS CUANDO SON  
 INOCULADOS 5 TUBOS DE 10 ml.-1 TUBO DE 1 ml.-1 TUBO DE 0.1 ml.

NUMERO DE TUBOS QUE DAN REACCION POSITIVA DE			M.M.P. DE COLIFORMES POR 100 ml.
5 tubos de 10 ml. c/u	1 tubo de 1 ml. c/u	1 tubo de 0.1 ml. c/u	
0	0	0	0.0
0	0	1	2.0
0	1	0	2.0
0	1	1	4.0
1	0	0	2.2
1	0	1	4.4
1	1	0	4.4
1	1	1	6.7
2	0	0	5.0
2	0	1	7.6
2	1	0	7.6
2	1	1	10.0

NUMERO DE TUBOS QUE DAN REACCION POSITIVA DE			N.M.P. DE COLIFORMES POR 100 ml.
5 tubos de 10 ml. c/u	1 tubo de 1 ml. c/u	1 tubo de 0.1 ml. c/u	
3	0	0	8.8
3	0	1	12.0
3	1	0	12.0
3	1	1	16.0
4	0	0	15.0
4	0	1	20.0
4	1	0	21.0
4	1	1	27.0
5	0	0	38.0
5	0	1	96.0
5	1	0	240.0
5	1	1	Indeterminado

Número más probable (N.M.P) de bacteria coliformes por 100 ml.  
 PARA VARIAS COMBINACIONES DE RESULTADOS POSITIVOS CUANDO SON  
 INOCULADOS 5 TUBOS DE 10 ml., 5 TUBOS DE 1

COMBINACION	NMP / 100 ml.	COMBINACION	NMP / 100 ml.	COMBINACION	NMP / 100 ml.
0 0 0	0	3 2 1	17	5 3 0	79
0 0 1	3	4 0 0	13	5 3 1	110
0 1 0	2	4 0 1	17	5 3 2	140
0 2 0	4	4 1 0	17	5 3 3	180
1 0 0	2	4 1 1	21	5 4 0	130
1 0 1	4	4 1 2	26	5 4 1	170
1 1 0	4	4 2 0	22	5 4 2	220
1 1 1	6	4 2 1	26	5 4 3	280
1 2 0	6	4 3 0	27	5 4 4	350
2 0 0	5	4 3 1	33	5 5 0	240
2 0 1	7	4 4 0	34	5 5 1	350
2 1 0	7	5 0 0	23	5 5 2	540
2 1 1	9	5 0 1	31	5 5 3	920
2 2 0	9	5 0 2	43	6 5 4	1600
2 3 0	12	5 1 0	35	5 5 5	2400
3 0 0	8	5 1 1	46		
3 0 1	11	5 1 2	63		
3 1 0	11	5 2 0	49		
3 1 1	14	5 2 1	70		
3 2 0	14	5 2 2	94		

Número más probable (N.M.P) de bacteria coliformes por 100 ml.  
 PARA VARIAS COMBINACIONES DE RESULTADOS POSITIVOS CUANDO SON  
 INOCULADOS 5 TUBOS DE 10 ml.

No. TUBOS POSITIVOS	NMP / 100 ml.	No. TUBOS POSITIVOS	NMP / 100 ml.	No. TUBOS POSITIVOS	NMP / 100 ml.
0	2.2	2	5.1	4	16
1	2.2	3	9.2	5	16

DENSIDAD ESPERADA DE COLIFORMES POR 100 ml.

2 - 540  
 20 - 5400  
 200 - 54000  
 2000 - 540000

SERIES DECIMALES (5 TUBOS DE CADA UNA)

1 Ql y 0.1 ml.  
 1, 0.1 y 0.1 ml.  
 0.1, 0.001 y 0.001 ml.  
 0, 0.1, 0.001 y 0.0001 ml.

La frecuencia de estos ensayos es diaria, en cumplimiento de lo dispuesto en la reglamentación ya citada para poblaciones de más de 100.000 habitantes. Además debe hacerse mínimo un ensayo anual que incluya las demás características físico-químicas.

En la planta estos otros ensayos se realizan con la siguiente periodicidad: cada tres días, los ensayos de dureza total, dureza de calcio, calcio, magnesio y hierro total; con frecuencia semanal, la determinación de acidez, sulfatos, aluminio, cromo hexavalente, gas carbónico libre, nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos, oxígeno disuelto, materia orgánica, sólidos disueltos, sólidos en suspensión, y sólidos totales; se hacen mensualmente, la determinación de cobre, cianuro, bario, fosfatos, detergentes, grasas y aceites.

Para el estudio bacteriológico, por tener Cartagena más de 500.000 habitantes y menos de 1'000.000, deben tomarse como mínimo 140 muestras más 2 por cada 10.000 habitantes. Así el número de muestra que deben tomarse en la red, sobre una población estimada de 700.000 habitantes, es de 280 muestras mensuales. Sin embargo el número promedio de muestra tomadas fué de 152. Este valor resulta bajo, y se explica en parte por las deficiencias en cuanto a medio de transporte que debió afrontar la planta.

La toma de muestras se realiza en las distintas unidades de cada planta, así se toma una muestra de uno de los sedimentadores o de uno de los filtros, sin que tengan que ser correspondientes. Esto trae como consecuencia que dichos valores no permitan el análisis riguroso para una unidad en particular. Se toma una única muestra durante el día en los sitios determinados. Se muestrea también en los tanques de almacenamiento y en el manhole de salida hacia la ciudad.

En la red de distribución la toma de muestras se hacen sobre sitios distintos por toda la ciudad, pero sin que en su determinación se cuente con la ayuda gráfica de un plano conteniendo las distintas mallas y nudos que conforman la red, lo que aseguraría un mayor cubrimiento al elegir los puntos de muestreo.

Además de los procedimientos mencionados, el laboratorio también hace eventualmente el control de calidad del sulfato de aluminio recibido en la planta.

**6.4.2. Estadísticas de la calidad de agua.** En el laboratorio de la planta se recopilan todos los formatos con la información de los ensayos realizado diariamente. Se presentan resúmenes mensuales, pero en su gran mayoría, esta información se pierde porque no existen los recursos

ni técnicos ni humanos que permitan sistematizar esta información.

A continuación se presenta nuevamente la Tabla 107, conteniendo la distribución de frecuencias de los residuales de cloro medidos durante el año 1989. Se presentan también las distribuciones correspondientes a la turbiedad y el color para el mismo período.

**TABLA 107.** Frecuencia de presentación de valores de cloro residual. Acueducto de Cartagena.

RESIDUAL DE CLORO - VALORES PROMEDIO MEDIDOS DURANTE EL AÑO DE 1989

RANGOS DE CI RESIDUAL	TANQUE 1			TANQUE 2			TANQUE 3			SALIDA DE LA PLANTA		
	FRECUENCIAS n	%	% acum.	FRECUENCIAS n	%	% acum.	FRECUENCIAS n	%	% acum.	FRECUENCIAS n	%	% acum.
0,0 - 0,09	0	0,0	0	8	2,8	2,8	2	0,7	0,7	0	0,0	0,0
0,1 - 0,19	5	1,7	1,7	17	5,9	8,7	3	1,0	1,7	2	0,7	0,7
0,2 - 0,29	3	1,0	2,7	11	3,8	12,5	3	1,0	2,7	5	1,7	2,3
0,3 - 0,39	3	1,0	3,7	20	7,0	19,5	1	0,3	3,0	6	2,0	4,3
0,4 - 0,49	11	3,7	7,3	20	7,0	26,5	4	1,3	4,3	18	6,0	10,4
0,5 - 0,59	24	8,0	15,3	39	13,6	40,1	7	2,3	6,7	31	10,4	20,7
0,6 - 0,69	33	11,0	26,3	38	13,2	53,3	17	5,7	12,3	45	15,1	35,8
0,7 - 0,79	46	15,3	41,7	40	13,9	67,2	20	6,7	19,0	53	17,7	53,5
0,8 - 0,89	59	19,7	61,3	32	11,1	78,4	41	13,7	32,7	73	24,4	77,9
0,9 - 0,99	45	15,0	76,3	21	7,3	85,7	62	20,7	53,3	23	7,7	85,6
1,0 - 1,09	31	10,3	86,7	13	4,5	90,2	56	18,7	72,0	32	10,7	96,3
1,1 - 1,19	16	5,3	92,0	12	4,2	94,4	37	12,3	84,3	6	2,0	98,3
1,2 - 1,29	12	4,0	96,0	10	3,5	97,9	24	8,0	92,3	2	0,7	99,0
1,3 - 1,39	3	1,0	97,0	2	0,7	98,6	13	4,3	96,7	2	0,7	99,7
1,4 - 1,49	4	1,3	98,3	1	0,3	99,0	2	0,7	97,3		0,0	99,7
1,5 - 1,59	1	0,3	98,7	2	0,7	99,7	1	0,3	97,7		0,0	99,7
1,6 - 1,69	2	0,7	99,3		0,0	99,7	6	2,0	99,7		0,0	99,7
1,7 - 1,79	1	0,3	99,7		0,0	99,7	1	0,3	100,0		0,0	99,7
1,8 - 1,89		0,0	99,7		0,0	99,7				1	0,3	100,0
1,9 - 1,99	1	0,3	100,0		0,0	99,7						
2,0 - 2,09				1	0,3	100,0						
	300			287			300			299		

**TABLA 109.** Distribución de frecuencias de la turbidez y color del agua producida. Año 1989.

<b>TURBIEDAD</b>			
Rangos de turbiedad (U.N.T.)	Frecuencias		Acumulada
	Real	Porcentual	
0,00 - 1,00	116	39,5	39,5
1,01 - 1,49	77	26,2	65,7
1,50 - 1,99	85	28,9	94,6
2,00 - 2,49	11	3,7	98,3
2,50 - 2,99	5	1,7	100,0

<b>COLOR</b>			
Rangos de color (U.C.)	Frecuencias		Acumulada
	Real	Porcentual	
0,00 - 4,99	96	32,4	32,4
5,00 - 9,99	191	64,5	96,9
10,00 - 14,99	8	2,7	99,6
15,00 - 19,99	1	0,3	99,9

Los datos anteriores nos permiten afirmar que el 75,3% del tiempo se esta produciendo agua cuyo residual de cloro esta entre 0,5 y 1,0 mg/l; y que en el 99% del tiempo se produce agua con turbidez por debajo de 5 U.N.T. y de color inferior a las 15 U.C. que establecen las normas como valores máximos permisibles.

En cuanto a los valores deseables, solo en el 39,5% del tiempo se obtienen turbiedades menores de 1 U.N.T, y el 32,4% del tiempo el color es inferior a las 5 U.C.

Debe aclararse que estos datos corresponden a una sola lectura diaria y que por lo tanto no son fiel reflejo del comportamiento de la calidad del agua producida.

**6.4.3 Recursos para el control de calidad.** La primera observación en cuanto a la existencia de recursos, es la doble función que cumple el laboratorio. Además de ser uno solo para las tres plantas, debe realizar los ensayos de tratabilidad del agua cruda. El laboratorio de control de calidad debería ser para este uso exclusivo, y los ensayos de tratabilidad deberían ser realizados por los operadores o por personal de laboratorio distinto de quienes están a cargo de la fiscalización de estas mismas labores.

En cuanto al personal de laboratorio, resulta insuficiente para lograr hacer el número real de ensayos que deberían estarse haciendo. Se hace necesario la contratación de por lo menos dos auxiliares de laboratorio, que puedan trabajar por turnos, a fin de que estas funciones de control se realicen las 24 horas del día. También es necesario la contratación de un analista de sistemas o al menos un transcriptor de datos, que

permita mantener sistematizada toda la información generada por el laboratorio.

De los recursos materiales, debemos decir que esta dependencia no escapa a la estrechez de recursos con que laboran las demás unidades de la planta. Los equipos existentes ya se hacen obsoletos, y no existe una política trazada de reposición y actualización de los mismos.

Es preocupante también la dificultad que se tiene para conseguir los reactivos necesarios, y la limitación en la recolección de muestras en la ciudad por la falta de un vehículo destinado exclusivamente a este fin.

Finalmente, el laboratorio de control de calidad, debería tener entre sus funciones normales la investigación permanente de variaciones en el método de tratamiento y el ensayo de los nuevos productos en el mercado para el tratamiento de aguas.

Debemos concluir entonces que si bien no se realizan todos los controles y el número de ensayos que deberían hacerse en la planta de tratamiento de una ciudad de la importancia de Cartagena, con los escasos recursos disponibles, se logra garantizar parcialmente la calidad del agua que se consume en la ciudad.

## 6.5 EVALUACION DE LA ADMINISTRACION

Una planta de tratamiento de agua se asemeja a una institución industrial, en la cual a partir de la materia prima y luego de unos procesos establecidos se entrega como producto final unitario el metro cúbico de agua tratada apta para el consumo humano.

Su buen desempeño se medirá en función de la cantidad, la calidad y los costos de producción. Así será eficiente o no en la medida que se produzca el volumen de agua requerido, esta cumpla con los parámetros de calidad establecidos y su producción se haga a costos razonables.

Como se dijo anteriormente la planta de tratamiento se encuentra dentro del sistema operacional de una empresa de servicios públicos y su administración no es independiente de la de esta última. En el caso de las plantas objeto de este estudio, están bajo la administración de las Empresas Públicas Municipales de Cartagena.

Esta entidad a sus diferentes sistemas organizacionales les denomina direcciones. Tenemos así la Dirección Administrativa, Dirección Financiera, Dirección Técnica (o de proyectos) y dos Direcciones de Operaciones: La de Aseo, Vías, Parques y Mercados; y la Dirección de

Operaciones de Acueducto y Alcantarillado. Estas direcciones a su vez se dividen en departamentos y estos en secciones. Esta distribución de funciones y responsabilidades se ve claramente en el organigrama de la Empresa en la Figura 96.

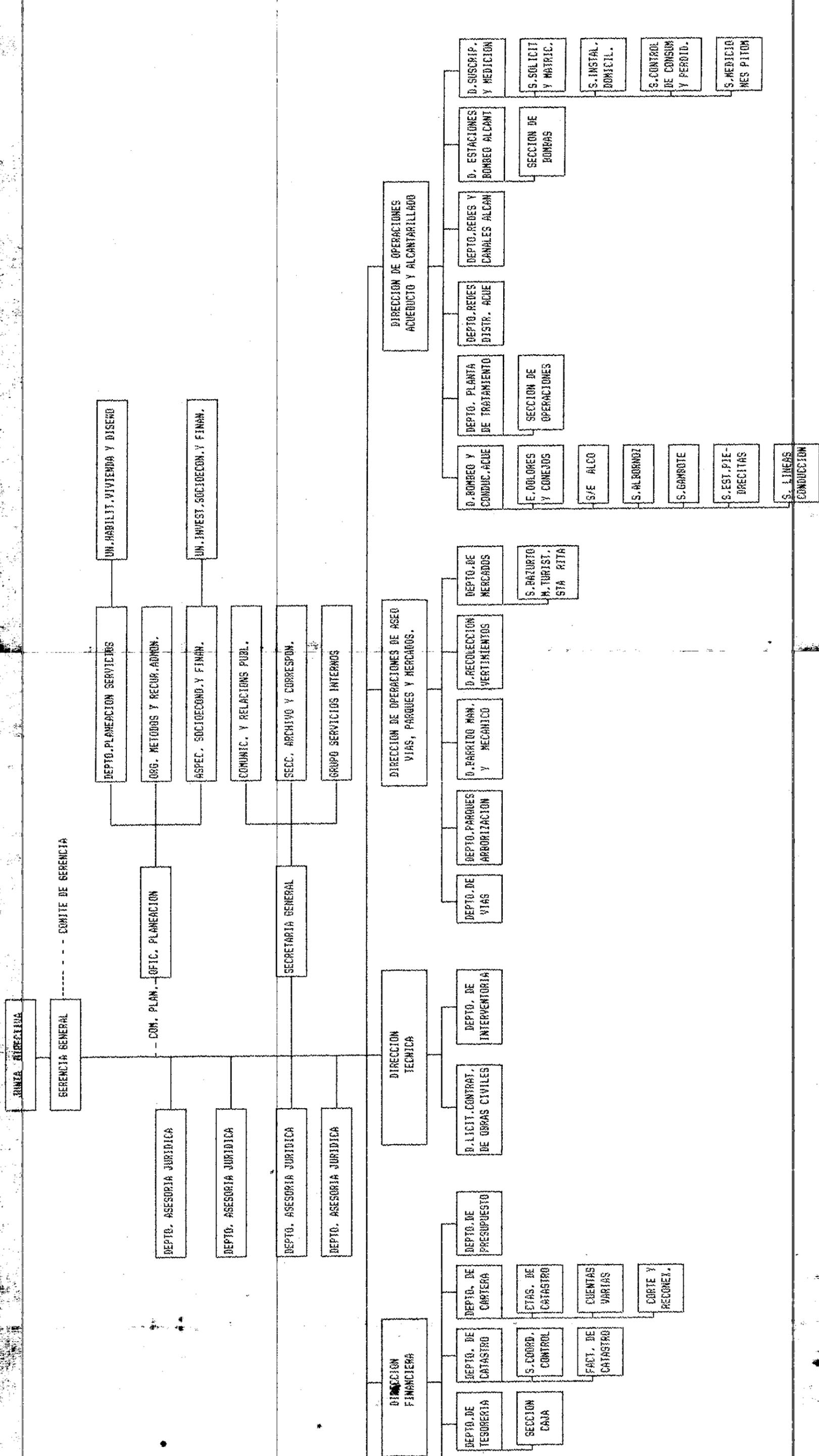
La buena administración de la planta de tratamiento dependerá principalmente de:

- La ejecución de la Dirección Administrativa.
- La eficiente interrelación entre las otras Direcciones.

Si estas dos condiciones se dan, la administración se limitará a la supervisión de rutina, la tramitación a tiempo de las gestiones necesarias y al suministro oportuno de información.

Pero si la administración general de la empresa es deficiente, en la planta de tratamiento deben hacerse los correctivos necesarios para superar en lo posible las dificultades resultantes.

Además la administración de la planta tiene responsabilidades sobre cada uno de los elementos indispensables para su funcionamiento. En términos generales estas son:



- Instalaciones físicas y equipos. Deberá supervisar condiciones de operación y mantenimiento.
  
- Transporte, servicios internos y comunicaciones. Deberá preveer el transporte de sus empleados si se encuentra retirada la ciudad así como los servicios de cafetería, primeros auxilios y demás que requiere una institución que labora las 24 horas del día.
  
- Suministros y reservas en bodega. Debe intervenir en la fijación de especificaciones para la compra de equipo y materiales, para la contratación de servicios de mantenimiento, la magnitud de reservas en sus bodegas y el control de las mismas.
  
- Administración interna. Deberá subsanar cualquier falla en la administración general y regular las relaciones con la Dirección Administrativa y las demás direcciones de la empresa.
  
- Recursos humanos. Deberá ejercer el liderazgo dentro de la planta, la supervisión adecuada, fortalecer la armonía laboral y velar por la continua capacitación del personal.
  
- Agua cruda. Deberá asumir responsabilidades en relación con la conservación del agua cruda, participando en los

programas para proteger la cuenca hidrográfica, la regulación del uso de fertilizantes y plaguicidas, el planeamiento racional del recurso hídrico en la zona y otros temas afines.

Los criterios utilizados para evaluar la administración de la planta de tratamiento son:

- Gestión de personal
- Gestión de materiales
- Organización administrativa
- Servicios generales

6.5.1 Evaluación de la gestión de personal. Se trata de establecer las políticas de personal de las empresas para seleccionar y adiestrar a su personal y la forma en que el jefe de la planta administra estos recursos humanos.

Se analizaron los siguientes aspectos: El reglamento interno de trabajo, el registro de personal; la programación y jornadas de trabajo; la selección y capacitación; la dotación del personal y la higiene en el trabajo

La información recogida de múltiples entrevistas y observaciones hechos por el evaluador se condensan a continuación.

Del reglamento del trabajo. Las Empresas Públicas tienen un Reglamento de Trabajo para regular las relaciones con sus trabajadores, aprobado por el Ministerio del Trabajo. En el se tratan distintos aspectos referentes a deberes y derechos de sus empleados según se resume en la Tabla 110. Copia del mismo se encuentra en lugar visible dentro de la planta a fin de que pueda ser consultado frecuentemente por el personal.

Este reglamento es ampliado con los compromisos pactados entre la Empresa y el Sindicato de sus trabajadores en la convención colectiva que normalmente tiene una vigencia de dos años.

Hace también parte de la reglamentación del trabajo el Manual de Funciones de las Empresas Públicas. En el se definen los cargos, sus obligaciones específicas y se delimitan responsabilidades.

Del registro de personal. En la planta de tratamiento no se lleva un registro del personal que labora en la misma. Este registro se hace en el departamento de Relaciones Laborales de la Dirección Administrativa de las Empresas.

**TABLA 110.** Resumen de temas contenidos en el Reglamento de trabajo y Convención Colectiva de Trabajo.

---

1. Se establecen las condiciones de admisión.
  2. Se fija el período de prueba.
  3. Se establecen normas para contratación.
  4. Se establecen horarios normales y horarios por turnos.
  5. Establece normas de pago para trabajo nocturno, horas extras, dominicales y vacaciones.
  6. Normaliza el pago de prestaciones sociales y extralegales.
  7. Establece normas para servicios médico al trabajador y sus familiares.
  8. Establece obligaciones y prohibiciones al trabajador.
  9. Establece las obligaciones de la empresa.
  10. Tiene normas y procedimientos para faltas y sanciones.
  11. Establece las causas de retiro.
  12. Establece normas para reclamar ante la empresa.
  13. Prevee permisos sindicales, y permisos por nacimiento de un hijo o pérdida de un familiar.
  14. Establece la obligación de la empresa de aportar auxilios para el fomento del deporte, sindical y fondo médico de sus empleados.
  15. Reglamenta la dotación de uniformes y demás elementos de seguridad en el trabajo.
  16. Tiene otras disposiciones.
-

En la Tabla 111 se presenta un resumen del contenido de dicho registro. Se recomienda llevar en la planta de tratamiento un registro de personal propio, que no necesariamente debe ser tan completo como el llevado por el Departamento de Relaciones Laborales. Este registro será de mucha utilidad cuando se requiera localizar con urgencia a un trabajador, o se quieran programar cursos internos, simulacros de operación de emergencia, actividades especiales, etc.

**TABLA 111. Evaluación del registro de personal.**

---

1. El registro de personal tiene revisión periódica.
2. Está actualizado.
3. Tiene registro de cada persona con su hoja de vida completa antes de ingresar.
4. Se establecen las especializaciones en cada caso.
5. Se registran los cursos de capacitación y entrenamiento en y fuera de la empresa.
6. No se tiene establecido un escalafón, las fechas de cambio de cargo ni de ascenso.
7. Se llevan registros de ausencia por incapacidades y licencia.
8. Se registran las sanciones solo en casos severos.
9. Se registran las personas a cargo del trabajador.
10. Se registran los servicios médicos prestados al trabajador y su familia.
11. Se registran los pagos por salarios y prestaciones.

De la programación del trabajo. En la planta de tratamiento El Bosque se dan principalmente dos modalidades de trabajo, según lo dispuesto en el Reglamento interno de trabajo. La jornada normal de trabajo y el trabajo por turnos.

Según el reglamento la jornada normal es de lunes a viernes desde las siete de la mañana hasta las cinco de la tarde. En la planta este es el horario para el personal de administración, mantenimiento y laboratorio. El trabajo por turnos es el programado para los operadores y sus ayudantes.

Ellos trabajan durante un turno de 12 horas y descansan las 24 horas siguientes. Actualmente el personal de laboratorio trabaja hasta las 4 de la tarde y compensa el tiempo el Sábado de 7 a 12 m. Además se programan jornadas adicionales de trabajo para los sábados, domingos y días feriados al personal de mantenimiento y ayudantes de patio, según se haga necesario, de 7 de la mañana a 3 de la tarde. Estas jornadas constituyen trabajo extra. Así en estas fechas están en la planta además de los operadores y ayudantes de turno, un técnico de mantenimiento y varios ayudantes de patio. Los turnos de operación de 12 horas se cambian a las 7 de la mañana y a las 7 de la noche, y por lo genral no hay rotación entre

quienes conforman los turnos.

No hay personal supernumerario para hacer los reemplazos por vacaciones del personal de operaciones. El reemplazo por vacaciones de un operador lo hace uno de sus ayudantes de operación, y estos a su vez son reemplazados por uno de los ayudantes de patio. Esto no produce mayores traumatismos a la operación debido al relativo conocimiento de las nuevas tareas y a la simplicidad actual de las mismas.

El jefe de la planta elabora la programación de los períodos de vacaciones. Los mismos se distribuyen durante el año evitando la concentración de las mismas en un sólo período. La programación es conocida por los trabajadores.

**Selección y adiestramiento.** Los procedimientos correspondientes están contemplados en el Reglamento interno de trabajo y en la Convención Colectiva. En la misma la Empresa se compromete a suplir las vacantes dándole prelación a la promoción de sus trabajadores según su antigüedad y sus conocimientos, antes de emplear personal nuevo.

Así mismo se contempla la contratación de aprendices para

los distintos cargos, mediante un contrato especial, y la programación de cursos de adiestramiento en el manejo de nuevos equipos al personal encargado de su operación y mantenimiento, ya sea en la Empresa o fuera de ella, así como de cursos de actualización.

En la planta de tratamiento, el jefe de la misma participa en la fijación de requisitos y experiencias necesarias para ocupar los cargos en la planta. Además tiene programado una serie de cursos de entrenamiento para operaciones especiales. Dentro de esta programación se desarrolló el año pasado un curso de actualización sobre los procesos del tratamiento del agua con la asistencia del personal de la planta. Así mismo asistieron a un curso de electricidad, dictado en la misma planta. Es de resaltar que en la planta existe un salón de conferencias debidamente acondicionado para estos fines, con capacidad para 30 personas.

Los profesionales de la planta de tratamiento participan con alguna regularidad en Congresos y cursos de actualización organizadas a nivel nacional por las autoridades sanitarias. La planta de tratamiento El Bosque ha sido ya sede de algunos de estos eventos viendose beneficiada por los conceptos aportados por los profesionales concurrentes.

De la dotación de implementos de trabajo. La Empresa cumple con las disposiciones legales de suministrar uniformes y calzado a sus trabajadores. Las entregas son semestrales y consisten en cinco uniformes (overol y camisa azul) y un par de zapatos. Anualmente reciben un par de botas.

Además se les entrega protectores para los oídos, protectores para la respiración y gafas cerradas para protección de la vista durante el manejo del sulfato de aluminio. Al personal de operación se les suministra guantes de cuero y mascarillas para manejo de cloro.

De la higiene y la seguridad. Las principales observaciones se detallan en la Tabla 112.

Si bien las condiciones de higiene y seguridad del trabajo en la planta son buenas es necesario establecer una normativa al respecto. En esta deberán establecerse las situaciones de riesgo para la integridad de los trabajadores dentro de la planta y los cuidados especiales que deben tenerse para evitarlos.

Además es urgente una señalización de los posibles accidentes de trabajo y de como evitarlos, localizada en los distintos sitios de la planta. Los riesgos

principales de accidentes son caídas durante el lavado de flocculadores y sedimentadores e inhalación de cloro por fugas.

TABLA 112. Evaluación de la higiene y seguridad.

1. No existe un reglamento de higiene y seguridad.
2. El personal no usa regularmente los elementos de seguridad.
3. Las máscaras contra cloro no están situadas en un lugar estratégico.
4. No existen estadísticas de accidentalidad.
5. Los equipos tienen guardas de protección en las partes móviles, en su gran mayoría.
6. No hay afiches indicadores de accidentes y de como evitarlos.
7. El personal desconoce un reglamento de seguridad.
8. Los obreros de manejo de sustancias químicas tienen elementos de protección pero no siempre los usan.
9. Los mecánicos y electricista tienen muy pocos elementos de protección.
10. Existe un equipo de primeros auxilios.
11. No se cuenta con un equipo de oxígeno de emergencia para casos de intoxicación con cloro.

En la planta existen algunos elementos de protección y un botiquín para primeros auxilios pero es objetable que las