

**ANÁLISIS POR MEDIO DE ENSAYOS DEL TIEMPO DE RETENCIÓN Y  
GRADIENTE HIDRÁULICO DEL PROCESO DE FLOCULACIÓN DE LA  
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE “LO DE COY”**

**Erik Fernando Hernández Ramírez  
Asesorado por Ing. Alfredo Jehovany Rivera Juárez**

**Guatemala, octubre de 2003**



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA**



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympto Paíz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Ronny De Jesús Mayorga Licona
EXAMINADOR	Ing. Wuillian Ricardo Yon Chavarria
EXAMINADOR	Ing. Jeovany Rudaman Miranda Castañon
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco



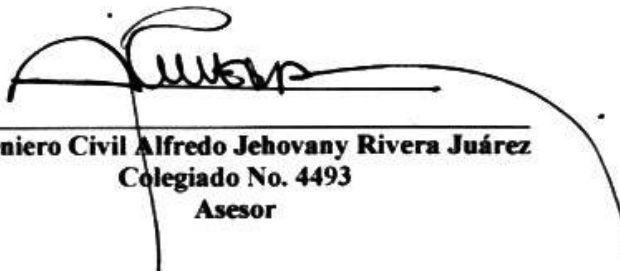
Guatemala 28 de julio de 2003

Ingeniera:  
Carmen Mariana Mérida Alva  
Jefe del departamento de Hidráulica  
Universidad De San Carlos De Guatemala  
Ciudad Universitaria, Zona 12  
Ciudad De Guatemala.

Apreciable Ingeniera:

Por este medio me dirijo a usted, para informarle que el trabajo de graduación titulado **ANÁLISIS POR MEDIO DE ENSAYOS DEL TIEMPO DE RETENCIÓN Y GRADIENTE HIDRÁULICO DEL PROCESO DE FLOCULACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE "LO DE COY"**, desarrollado por el estudiante Erik Fernando Hernández Ramírez, con carné 1998-11690, de acuerdo al protocolo aprobado por La Escuela De Ingeniería Civil, en su oportunidad, ha sido revisado por el suscrito en calidad de asesor, contando con mi aprobación.

Atentamente,

f.   
Ingeniero Civil Alfredo Jehovany Rivera Juárez  
Colegiado No. 4493  
Asesor

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

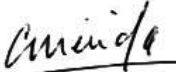
Guatemala 19 de Agosto de 2003

Ingeniero  
Carlos Salvador Gordillo García  
Director Escuela Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos

Señor Director:

Después de analizar y revisar el trabajo de graduación presentado por el estudiante Erik Fernando Hernández Ramírez, titulado ANÁLISIS POR MEDIO DE ENSAYOS DEL TIEMPO DE RETENCIÓN Y GRADIENTE HIDRÁULICO DEL PROCESO DE FLOCULACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE "LO DE COY", y quien contó con la asesoría del ingeniero Alfredo Jehovany Rivera Juárez, tengo a bien manifestar que dicho trabajo se ha ejecutado conforme a los requisitos establecidos. Por lo que, en mi calidad de jefe del departamento de Hidráulica de la Escuela de Ingeniería Civil, me permito solicitar se continúen los trámites respectivos para su aprobación.

Atentamente,

  
Inga. Carmen Marina Mérida Alva  
Jefe del departamento de Hidráulica  
Escuela de Ingeniería Civil

FHER/fher

Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Decanato  
Tel. 4769579-4760029-4423505 Ext. 101-102  
4439500 Ext. 1549  
Fax 4760365

Ref. DTG. 340-2003

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS POR MEDIO DE ENSAYOS DEL TIEMPO DE RETENCIÓN Y GRADIENTE HIDRÁULICO DEL PROCESO DE FLOCULACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE " LO DE COY "**, presentado por el estudiante universitario **Erik Fernando Hernández Ramírez**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Sydney Alexander Samuels Milson  
DECANO

Guatemala, octubre de 2003.



/gdech

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- MI MADRE** Mayra Elizabeht Ramírez Siliezar, por su amor, apoyo incondicional y por su esfuerzo para formar hombres profesionales de bien. Gracia y que Dios te bendiga.
- MI PADRE** Carlos Francisco Hernández Juárez, por sus consejos y apoyo moral en mi formación como persona.
- MI HERMANO** Francisco Jorge Alejandro Hernández Ramírez, por brindarme su apoyo moral y porque Dios nos dio la oportunidad de tenerte hoy en día junto a nosotros.
- MIS ABUELOS** Victoria Siliezar (Q.E.P.D.) y Nery Ramírez, por darme su cariño, su apoyo.
- MI ABUELA** Angélica Juárez, por su cariño, apoyo moral y por su paciencia.
- MI TÍA** Blanca Estela Hernández Juárez, por ser como una madre para mí y todos sus sobrinos, una madre que da cariño, apoyo incondicional y corrige a sus hijos, para que sean personas de bien y provecho.
- MIS TÍAS Y TÍOS** Ana (Q.E.P.D.), Gloria Hernández Juárez, José Ramírez, gracias por estar a mi lado y brindarme su apoyo.
- MI TÍA Y TÍO** Bety, Jehovany, por ser parte fundamental en la elaboración de este trabajo y por su apoyo incondicional. Gracias y que Dios los bendiga.
- MIS PRIMOS** Jorge, Jonatan, Josué Lima, Alejandro González, María Alvarado, Geovany y los López.
- MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS** Ana Rivera, Verónica Álvarez, Enio López, Antonio Suruy y Vicky Hernández, por su amistad y fraternidad.



- LOS CATEDRÁTICOS** De la Escuela de Ingeniería Civil, a los catedráticos de la Facultad de Ingeniería, a la profesora Izolina de Cabrera, a los catedráticos del Instituto Técnico de Construcción, a del Instituto Juventud Nueva y los de la Escuela El Éxodo.
- MIS COMPAÑEROS** De la Facultad de Ingeniería por ser su amistad.
- FACULTAD DE INGENIERÍA** Por sus sabias enseñanzas para la formación de ingenieros capaces.
- AL PUEBLO DE GUATEMALA** Que con su esfuerzo y trabajo, nos dan la oportunidad de ingresar a la Universidad de San Carlos de Guatemala, y obtener una carrera universitaria. Dios bendiga al pueblo de Guatemala.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>DIOS</b>	Por la vida que me ha dado, por guiarme y darme la oportunidad de lograr todas las metas que me he propuesto.
<b>MI FAMILIA</b>	Tíos y primos que me ayudaron a lo largo de mi carrera.
<b>INGENIERO ALFREDO RIVERA JUÁREZ</b>	Por ser amigo, tío y asesor, gracias por sus consejos, apoyo incondicional sus correcciones su paciencia y por ser el director en la elaboración de este documento.
<b>EMPAGUA</b>	Por darme la oportunidad de realizar el presente trabajo de graduación.
<b>INGENIERO JULIO ESCOTO ROSALES</b>	Por brindarme su apoyo en la realización de este documento y darme la oportunidad de iniciarme en el campo profesional.
<b>MIS COMPAÑEROS</b>	De la Dirección Ejecutora de proyectos y del Proyecto ANC, por su apoyo y amistad.
<b>INGENIERO VÍCTOR PAZ</b>	Por darme la oportunidad de realizar en la Planta “Lo De Coy”, este documento y brindarme su apoyo.
<b>INGENIERO LUIS MENDOZA</b>	Por brindarme el apoyo necesario en la realización de este documento.
<b>DON LUIS Y JUAN</b>	Por se un elemento fundamental en la ejecución de este trabajo de graduación.
<b>INGENIERO ANTONIO SURUY</b>	Por su amistad, brindarme su ánimo y su ayuda a lo largo de la carrera.



## ÍNDICE GENERAL

<b>CARTAS DE TESIS</b>	
<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....	<b>VII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>XI</b>
<b>GLOSARIO</b> .....	<b>XIII</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>XIX</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>XXI</b>
<b>HIPÓTESIS</b> .....	<b>XXIII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>XXV</b>
<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>XXVII</b>
<b>1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE LO DE COY</b> .....	<b>1</b>
<b>2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE FLOCULACIÓN</b> .....	<b>9</b>
2.1. Proceso de floculación .....	9
2.2. Procesos previos a la floculación .....	10
2.2.1. Proceso de mezcla rápida .....	10
2.2.1.1. Medición de caudal .....	11
2.2.1.1.1. Parshall principal .....	11
2.2.1.1.1.1. Dosificadores .....	13
2.2.1.1.1.1.1. Sustancias químicas utilizadas en la planta “Lo De Coy” .....	13

2.3. Procesos posteriores a la floculación.....	14
2.3.1. Proceso de sedimentación.....	14
2.3.1.1. Canal de distribución de los sedimentadores.....	15
2.3.2. Proceso de filtración.....	15
2.3.3. Proceso de desinfección (cloración) .....	16
2.3.4. Otros componentes de la planta .....	16
<b>3. TEORÍA DE ENSAYOS .....</b>	<b>17</b>
3.1. Ensayo Teórico del tiempo de retención y gradiente de velocidad .....	17
3.1.1. Objetivo.....	17
3.1.2. Descripción .....	18
3.1.3. Procedimiento .....	18
3.2. Teoría de ensayo con trazadores .....	23
3.2.1. Objetivo.....	23
3.2.2. Descripción .....	23
3.2.3. Tipos de ensayos con trazadores .....	24
3.2.3.1. En forma continua .....	24
3.2.3.2. En forma Instantánea .....	26
3.2.3.2.1. Materiales utilizados en la prueba de trazadores.....	26
3.2.3.2.2. Procedimiento para realizar en el ensayo de trazadores ..	28
3.2.4. Sustancias trazadoras.....	30
3.2.5. Limitaciones de las pruebas con trazadores .....	31
3.3. Teoría de Modelo de flujos .....	33
3.3.1. Introducción .....	33
3.3.2. Modelos de flujo.....	33
3.3.3. Modelos de flujo intermitente .....	33
3.3.4. Modelos de flujo continuo .....	34
3.3.4.1. Modelo de flujo de pistón .....	34

3.3.4.2. Modelos de flujo con mezcla .....	34
3.4. Influencia del factor tiempo de retención.....	35
3.5. Uso de trazadores para determinar el tiempo de retención y características hidráulicas de un reactor.....	38
3.5.1. Inyección instantánea.....	38
3.5.2. Inyección continua.....	40
3.6. Características físicas que afectan a un reactor .....	40
3.6.1. Introducción.....	40
3.6.2. Análisis de las características de un reactor .....	41
3.6.3. Modelo simplificado de la teoría de Wolf-Resnick.....	41
3.6.4. Análisis de la curva de tendencia de concentración del trazador.....	46
<b>4. APLICACIÓN .....</b>	<b>53</b>
4.1. Ensayo Teórico .....	53
4.1.1. Selección de caudales.....	53
4.1.2. Resultados obtenidos.....	55
4.1.2.1. Determinación de los parámetros hidráulicos del proceso de Floculación .....	55
4.1.2.1.1. Volumen de la unidad de floculación.....	64
4.1.2.1.2. Tiempo teórico de retención.....	65
4.1.2.1.3. Gradiente de velocidad.....	65
4.2. Ensayo con trazadores.....	66
4.2.1. Variación de caudales .....	66
4.2.2. Datos obtenidos .....	66
4.2.2.1. Prueba de trazadores para el ensayo del caudal medio Q = 320 l/s .....	66
4.2.2.1.1. Cantidad de trazador.....	69
4.2.2.2. Prueba de trazadores para el ensayo del caudal Q=416 l/s .....	71

- 4.2.2.3. Prueba de trazadores en el caso de un caudal  $Q=480\text{l/s}$ .....75
- 4.2.2.4. Prueba de trazadores en el caso de un caudal  $Q=546.7\text{l/s}$ .76

## **5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....79**

5.1. Análisis de los resultados obtenidos del ensayo de trazadores .....	79
5.1.1. Análisis por el método de Wolf-Resnick.....	80
5.1.1.1. Análisis por el método de Wolf-Resnick para un caudal $Q=320\text{l/s}$ .....	80
5.1.1.1.1. Flujo de pistón.....	82
5.1.1.1.2. Porcentaje de volumen considerado como zona muerta .	82
5.1.1.1.3. Flujo mezclado .....	82
5.1.1.2. Análisis por el método de Wolf-Resnick para el caudal $Q=416.0\text{ l/s}$ .....	82
5.1.1.2.1. Flujo de pistón.....	84
5.1.1.2.2. Porcentaje de volumen considerado como zona muerta .	84
5.1.1.2.3. Flujo mezclado .....	84
5.1.1.3. Análisis por el método de Wolf-Resnick para el caudal $Q=480.0\text{ l/s}$ .....	84
5.1.1.3.1. Flujo de pistón.....	86
5.1.1.3.2. Porcentaje de volumen considerado como zona muerta .	86
5.1.1.3.3. Flujo mezclado .....	86
5.1.1.4. Análisis por el método de Wolf-Resnick para un caudal $Q=546.70\text{l/s}$ .....	86
5.1.1.4.1. Flujo de pistón.....	88
5.1.1.4.2. Porcentaje de volumen considerado como zona muerta .	88
5.1.1.4.3. Flujo mezclado .....	88
5.1.1.5. Resumen .....	89



5.1.2. Análisis de los resultados de la curva de tendencia de concentración del trazador .....	89
5.1.2.1. Análisis de los resultados de la curva de tendencia de concentración del trazador para un caudal $Q=320\text{l/s}$ .....	89
5.1.2.1.1. Índice de Morril.....	91
5.1.2.2. Análisis de los resultados de la curva de tendencia de concentración del trazador para un caudal $Q=416.0\text{ l/s}$ .....	93
5.1.2.2.1. Índice de Morril.....	95
5.1.2.3. Análisis de los resultados de la curva de tendencia de concentración del trazador para un caudal $Q=480.0\text{ l/s}$ .....	97
5.1.2.3.1. Índice de Morril.....	99
5.1.2.4. Análisis de los resultados de la curva de tendencia de concentración del trazador para un caudal $Q=546.47\text{l/s}$ ...	101
5.1.2.4.1. Índice de Morril.....	103
5.2. Análisis e interpretación de los parámetros en estudio .....	105
5.2.1. Análisis y comparación de los tiempos de retención .....	105
5.2.2. Análisis y comparación de los gradientes de velocidad ( $G$ ) .....	107
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>111</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>115</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>117</b>
<b>ÁPENDICES</b>	
<b>ANEXO</b>	



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Descripción de la planta de tratamiento de agua potable Lo De Coy .....	1
2.	Fotografía limnómetro del parshall secundario.....	19
3.	Fotografía nivelación del tirante de agua .....	19
4.	Fotografía del levantamiento topográfico de los floculadores .....	20
5.	Dimensionamiento de la sección de canal .....	22
6.	Fotografía de la secuencia del ensayo de trazadores en el caso instantáneo.....	27
7.	a) Influencia del periodo de retención en la eficiencia de la floculación (Prueba de Jarras).....	37
	b) Influencia del periodo de retención en la eficiencia teórica (Prueba de Jarras) y real en la floculación .....	37
8.	Uso de trazador en la unidad de floculación para la evaluación de su funcionamiento (floculador del tipo de vuelta en punta) .....	38
9.	Representación de la concentración del trazador en función del tiempo a la entrada y durante la inyección de la sustancia trazadora. ....	39
10.	Concentración de trazador en efluente de un reactor (aplicación instantánea).....	40
11.	Inyección continua.....	40

12.	Curva de 1-F(t) vrs. t/t <sub>0</sub> cantidad de trazador que permanece en el reactor.....	43
13.	Determinación de la pendiente y los valores $\theta$ , $p$ y $m$ .....	45
14.	Curva de tendencia de concentración del trazador .....	46
15.	Curva del Índice de Morril .....	51
17.	Curva de calibración número 1 $\log (C)= a*(pH)+b$ .....	68
18.	Curva de calibración número 2 $\log (C)= a*(pH)+b$ .....	73
19.	t/o vrs. 100-F(t) para un caudal de Q=320l/s .....	81
20.	t/o vrs. 100-F(t) para un caudal de Q=416.0 l/s .....	83
21.	t/o vrs. 100-F(t) para un caudal de Q=480.0 l/s .....	85
22.	t/o vrs. 100-F(t) para un caudal de Q=546.70 l/s .....	87
23.	Curva t vrs. C-Co para un caudal Q=320l/s .....	90
24.	Curva del índice de Morril para un caudal Q=320 l/s .....	92
25.	Curva t vrs. C-Co para un caudal Q=416.0 l/s .....	94
26.	Curva del índice de Morril para un caudal Q=416.0 l/s .....	96
27.	Curva t vrs. C-Co para un caudal Q=480.0 l/s .....	98
28.	Curva del índice de Morril para un caudal Q=480.0 l/s .....	100
29.	Curva t vrs. C-Co para un caudal Q=546.47 l/s .....	102
30.	Curva del índice de Morril para un caudal Q=546.47 l/s .....	104
31.	Fotografía de la entrada de la unidad de floculación .....	109
32.	Fotografía de los elementos de importancia de la unidades de floculación .....	110
33.	Propiedades de los coloides .....	125
34.	Fases de la coagulación .....	129
35.	Desestabilización de partículas (coagulación) .....	133
36.	Trasporte de particular (floculación).....	133

## TABLAS

I.	Aplicación de la ecuación del parshall secundario .....	10
II.	Aplicación de ecuación del parshall principal .....	11
III.	Modelos de flujo .....	35
IV.	Características del flujo en el un reactor determinado .....	45
V.	Parámetros principales de la curva de tendencia de concentración del trazador .....	47
VI.	Capacidad de producción de la planta de tratamiento de agua potable Lo De Coy .....	53
VII.	Datos de diseño de un floculador de la planta de tratamiento de agua potable "Lo De Coy .....	54
IX.	Determinación del volumen de la franja entre las pantallas de los floculadores, para un $Q=320\text{l/s}$ .....	56
IX.	Determinación del volumen de la franja entre las pantallas de los floculadores, para un $Q=320\text{l/s}$ .....	57
X.	Cotas del tirante de agua de los floculadores para los distintos caudales en análisis .....	58
XI.	Cotas del tirante de agua de los floculadores para los distintos caudales en análisis .....	59
XII.	Determinación de los parámetros hidráulicos teóricos del proceso de floculación (hoja de cálculo) .....	60
XIII.	Determinación de los parámetros hidráulicos teóricos del proceso de floculación (hoja de cálculo) .....	61
XIV.	Determinación de los parámetros hidráulicos teóricos del proceso de floculación (hoja de cálculo) .....	62
XV.	Determinación de los parámetros hidráulicos teóricos del proceso de floculación (hoja de cálculo) .....	63
XVI.	Resumen de los parámetros hidráulicos teóricos del proceso de floculación para el caudal $Q=320\text{l/s}$ .....	64

XVII.	Volúmenes para los caudales seleccionados .....	64
XVIII.	Tiempos de retención teóricos para los caudales seleccionados .....	65
XIX.	Gradiente de velocidad teórico $G$ ( $s^{-1}$ ) por tramo para los caudales seleccionados .....	66
XX.	Curva de calibración Número 1.....	67
XXI.	Resultados obtenidos de la prueba con trazadores para un caudal de $Q=320$ l/s .....	70
XXII.	Curva de calibración Número 2.....	72
XXIII.	Resultados obtenidos de la prueba con trazadores para un caudal de $Q=416$ l/s .....	74
XXIV.	Resultados obtenidos de la prueba con trazadores para un caudal de $Q=480$ l/s .....	75
XXV.	Resultados obtenidos de la prueba con trazadores para un caudal de $Q=546.7$ l/s .....	77
XXVI.	Resumen de resultados (método de Wolf-Resnick).....	89
XXVII.	Valores obtenidos de la figura 23.....	89
XXVIII.	Análisis del flujo para un caudal $Q=320$ l/s .....	91
XXIX.	Valores obtenidos de la figura 25.....	93
XXX.	Análisis del flujo para un caudal $Q=416.0$ l/s .....	95
XXXI.	Valores obtenidos de la figura 27.....	97
XXXII.	Análisis del flujo para un caudal $Q=480.0$ l/s .....	99
XXXIII.	Valores obtenidos de la figura 29.....	101
XXXIV.	Análisis del flujo para un caudal $Q=546.47$ l/s .....	103
XXXV.	Tiempos de retención por tramo para los diferentes caudales.....	105
XXXVI.	Tiempos de retención para los diferentes caudales. ....	105
XXXVII.	Gradientes de velocidad para los diferentes casos.....	107
XXXVIII.	Caudales, tiempos reales ( $t_r$ ), y gradientes de velocidad $G$ .....	121
XXXIX.	Tiempo de retención $t$ .....	123
XL.	Gradientes de velocidad $G$ .....	123

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b><math>C_k</math></b>	Corrección al caudal en $\left(\frac{p^3}{s}\right)$ ; pies cúbicos por segundo.
<b><math>C_o</math></b>	Concentración (mg/l).
<b><math>hf</math></b>	Pérdida de carga.
<b><math>(hf_c)</math></b>	Pérdida de carga en el canal.
<b><math>(hf_v)</math></b>	Pérdida de carga en las vueltas.
<b><math>h_{t_0}</math></b>	Altura del tirante de agua para un caudal.
<b><math>G</math></b>	Gradiente de velocidad.
<b><math>g</math></b>	Aceleración de la gravedad.
<b><math>l</math></b>	Grado de pureza del trazador (fracción de unidad).
<b><math>K</math></b>	Coefficiente de pérdida de carga en las curvas o vueltas, este Puede variar entre 2 y 4, usualmente se asume 3 ó 3.5.
<b><math>l</math></b>	Longitud del canal.
<b><math>n</math></b>	Coefficiente de pérdida de carga de <i>Manning</i> .
<b><math>P</math></b>	Peso de trazador a añadir al reactor (kg).
<b><math>Q</math></b>	Caudal que ingresa a la unidad. $\left[\frac{m^3}{s}\right]$
<b><math>Q_x</math></b>	Caudal que ingresa a la unidad para un determinado parámetro.
<b><math>RH</math></b>	Radio Hidráulico.
<b><math>t</math></b>	Tiempo de retención

<b><i>t<sub>dis</sub></i></b>	Tiempo de retención de diseño
<b><i>t<sub>o</sub></i></b>	Tiempo teórico de retención.
<b><i>t<sub>r</sub></i></b>	Tiempo de retención real.
<b><i>v<sub>c</sub></i></b>	Velocidad en los canales.
<b><i>v<sub>v</sub></i></b>	Velocidad en la vuelta.
<b><i>W</i></b>	Ancho de garganta [p]; pies.
<b><i>α</i></b>	Ancho del canal.
<b><i>γ</i></b>	Peso específico del agua. A una temperatura <b><i>T</i></b> en °C en la cual se esta realizando en ensayo.
<b><i>μ</i></b>	Viscosidad absoluta del agua. A una temperatura <b><i>T</i></b> en °C en la cual se esta realizando en ensayo.
<b><i>∇</i></b>	Volumen del reactor (m <sup>3</sup> ).



## GLOSARIO

<b>Agua cruda</b>	Agua sin ningún tratamiento, en estado natural tal como se obtiene de la fuente
<b>Agua potable</b>	Es el agua que se considera sanitariamente segura, agradable en su sabor y color, libre de cualquier contaminación, ya sean sustancias químicas, minerales, bacterias o virus. Es el agua que se considera satisfactoria para el consumo humano.
<b>Cal hidratada</b>	Químicamente se le denomina hidróxido de calcio <b>Ca(OH)<sub>2</sub></b> , llamada también cal apagada. Se utiliza para eliminar los carbonatos, dureza temporal, para el control del <b>pH</b> .
<b>Caudal</b>	Es la medida de la cantidad de volumen de agua que fluye en una sección determinada en unidades de tiempo.
<b>Concentración</b>	Es una medida de la cantidad de sustancias disueltas contenidas por unidad de volumen de solución. Se expresa como miligramos por litro (mg/l), miliequivalentes por litro, libras por galón y otros.

<b>Cortocircuito</b>	Se define como aquella parte de flujo que tiene una velocidad infinita y un tiempo de retención igual a cero.
<b>Densidad</b>	Relación entre la masa de un cuerpo sólido o líquido y la masa del agua, que ocupa el mismo volumen, a una determinada temperatura.
<b>Dosificación</b>	Aplicación de una sustancia por unidad de tiempo; se expresa como [mg/s], [mg/min], [lb/h] y otros.
<b>Filtro</b>	Unidades encargadas del proceso que consiste en pasar un líquido a través de un medio filtrante, con el propósito de eliminar la materia suspendida o coloidal, de un tipo que generalmente no puede eliminarse por sedimentación.
<b>Floculación</b>	Parte importante del proceso de coagulación en el que se produce la formación del flóculo.
<b>Floculador</b>	Unidad o reactor donde se produce la floculación; puede ser del tipo hidráulico o mecánico.
<b>Floculo</b>	Pequeña masa gelatinosa que se forma en un líquido por haberse agregado coagulantes. Es el transporte de las partículas suspendidas dentro del líquido.

**Gradiente de velocidad (G)** Es una de las variables más importantes el proceso de floculación y en la prueba de jarras, indica la intensidad de agitación que se le da a una masa de agua, para iniciar el proceso formación a los flóculos. El **G** está expresado en unidades de gradiente de velocidad y su adimensional es ( $s^{-1}$ ).

**Movimiento Browniano** Describe el movimiento constante e irregular de las partículas suspendidas en el solvente. La teoría cinética explica este movimiento desordenado de la siguiente manera: Las partículas en suspensión son bombardeadas por el movimiento permanente y desordenado de las moléculas del solvente. Dicho movimiento se intensifica por causa del calor, es decir que al aumentar la temperatura de suspensión aumenta el movimiento browniano.

**Polielectrolitos** Son una serie de compuestos orgánicos muy variados en su estructura química, como derivados del almidón y se producen en forma sintética. Se usan como coagulantes o como ayudantes de coagulación.

**Potencial de hidrógeno** Es una expresión de la concentración de los iones de hidrógeno. Varía desde 1 a 14. Expresa el grado de acidez o alcalinidad de las disoluciones.

<b>Potenciómetro</b>	Aparato utilizado para medir el potencial de hidrógeno <i>pH</i> .
<b>Prueba de jarras</b>	Es una prueba de laboratorio que simula las condiciones en las cuales coagula el agua en la planta de tratamiento. Se usa para determinar las cantidades óptimas de coagulante que se deben emplear para lograr la coagulación más eficiente.
<b>Reactor</b>	Se le denomina así a la unidad o elemento donde se efectúa un proceso de tratamiento de agua. Por ejemplo: un floculador, un sedimentador, un tanque y otros.
<b>Sedimentador</b>	Unidad encargada del proceso de asentamiento y depósito de la materia suspendida (flóculos), en el agua por la fuerza de la gravedad.
<b>Sustancias trazadoras</b>	Sustancias químicas que se aplican al afluente de una unidad; con la finalidad de medir su concentración.
<b>Tiempo de retención</b>	Es el tiempo real que el agua permanece sometida a un proceso de tratamiento, una unidad determinada. No siempre es igual al tiempo de retención teórico.

**Tiempo de retención teórico** Es el período de tiempo que teóricamente debe transcurrir para que el agua pase a través de un reactor, suponiendo que toda el agua se mueva a una velocidad uniforme; matemáticamente es igual al volumen del reactor dividido entre el caudal  $t_o = \frac{V}{Q}$ . También se conoce como período de retención o detención.

**Zona muerta** Es aquella parte del volumen del reactor donde la velocidad de la masa líquida es cero y el tiempo de retención llega a ser teóricamente infinito.



## RESUMEN

El presente trabajo de graduación, es un análisis de los principales parámetros hidráulicos que intervienen en el proceso de floculación de **La Planta De Tratamiento De Agua Potable “Lo De Coy”**, los cuales son el tiempo de retención  $t$  y el gradiente de velocidad  $G$ . Se escogió este tema ya que mi práctica profesional la realicé en EMPAGUA donde pude detectar algunos proyectos futuros, de los cuales se encuentra la ampliación de la planta Lo De Coy, por lo que se necesitará información de la operación actual de la planta. Para alcanzar este fin se analizaron los caudales correspondientes a: caudal medio de diseño  $Q=960\text{l/s}$ , caudal máximo de diseño  $Q=1248\text{l/s}$  y el caudal máximo histórico  $Q=1640\text{l/s}$ , este último caudal no fue considerado en el diseño.

El procedimiento a grandes rasgos fue el siguiente: se realizaron medidas topográficas de altimetría y planimetría de los floculadores; con la ayuda de un modelo matemático y hojas de cálculo se determinaron los parámetros teóricos ( $t$  y  $G$ ). Los tiempos reales de retención se determinaron utilizando cal hidratada para la realización del ensayos de trazadores. Los gradientes reales se determinaron utilizando los tiempos reales y las pérdidas de carga medidas. Se determinó que los tiempos reales y los tiempos teóricos son similares, dada esta condición existe predominancia de flujo de pistón, esto indica que los floculadores son eficientes hidráulicamente para el rango de caudales analizados.

En la estructura de entrada a los floculadores se están produciendo gradientes altos, que pueden estar afectando el proceso de floculación, para disminuir dicho efecto se propuso cambiar el punto de dosificación, a los parshall secundarios, también se propuso disipar la energía provocado por los parshall. Adicionalmente se presenta un cuadro que contiene una serie de caudales, tiempos de retención y gradientes de velocidad que servirán para realizar pruebas de laboratorio y determinar con estos los caudales que cumplan con los parámetros de calidad de agua y los hidráulicos.



## **OBJETIVOS**

### **General**

El objetivo general del presente trabajo es: determinar las características hidráulicas, parámetros operacionales y eficiencia de los floculadores, de la planta Lo de Coy. Así mismo se persiguen los objetivos específicos siguientes:

### **Específicos**

1. Determinar si la planta **Lo De Coy** es susceptible de ser optimizada sin mayores inversiones en lo que respecta al proceso de floculación.
2. Servir de un documento de consulta que pueda ser utilizado por los ingenieros proyectistas de los futuros cambios que se hagan en la planta Lo de Coy.
3. Proporcionar información hidráulica de los procesos de floculación que sirvan para realizar ensayos de laboratorio apegados a las condiciones reales de funcionamiento de la planta.



## HIPÓTESIS

- I. Desde el punto de vista hidráulico se puede ampliar el rango de caudales considerados en el diseño de los floculadores de **La Planta De Tratamiento De Agua Potable “Lo De Coy”**, sin afectar significativamente desde el mismo punto de vista, el proceso de floculación. Dicho rango de caudales puede ser determinado por el análisis de resultados de los ensayos para determinar el tiempo de retención  $t$  y el gradiente de velocidad  $G$  reales de operación.



## INTRODUCCIÓN

El abastecimiento de Agua a la ciudad capital es realizado actualmente en un alto porcentaje por la Empresa Municipal de Agua EMPAGUA y en menor cuantía por empresas particulares. Para realizar el abastecimiento, EMPAGUA cuenta con siete sistemas de producción de los cuales el de mayor capacidad de producción es el sistema llamado **Lo de Coy**.

La planta de tratamiento de agua potable **Lo De Coy** está situada al oeste de ciudad capital de Guatemala, en el municipio de Mixco y es el elemento final del **Acueducto Nacional Xayá- Pixcayá** cuya primera etapa se puso en servicio en 1979 para un caudal de estío de 1 m<sup>3</sup>/s sin embargo actualmente el acueducto tiene una capacidad de conducción de 3 m<sup>3</sup>/s. Por lo que en la investigación preliminar que se realizó, se prevé una optimización y posible ampliación de la planta de tratamiento, para aprovechar la capacidad instalada de conducción y también por el déficit de abastecimiento de agua por la que atraviesa actualmente la Ciudad Capital.

El sistema no cuenta con un embalse regulador por lo que los problemas principales que se prevé encontrar se deben a la variación de la calidad de agua que se trata actualmente con respecto a la calidad de agua en el momento de inicio de operación de la planta, además de la fluctuación de caudales que se dan entre la época de lluvia y la época seca, esta fluctuación de caudal incide directamente en el funcionamiento hidráulico de los floculadores y por medio del análisis de estos elementos se determinaran problemas y deficiencias, así como cualidades en el funcionamiento actual y la capacidad real que se tiene para el tratamiento del agua de acuerdo a los distintos caudales que se traten en la planta **Lo De Coy**.



## JUSTIFICACIÓN

Como se mencionó anteriormente la planta **Lo de Coy** y por lo tanto, sus unidades de floculación operan desde 1979 a la fecha, ya que en dicho período se han detectado ciertos problemas de operación siendo los más importantes:

- Fluctuaciones severas de calidad y caudal de agua
- Zona de entrada con gradientes de velocidad altos
- Volumen vertical que aparentemente pudiera ser utilizado
- Zonas de salida distribuyendo de tres floculadores a cuatro unidades de sedimentación

Debido a que actualmente EMPAGUA no logra dar servicio de agua durante veinticuatro horas y en algunas áreas durante muy pocas horas al día, se prevé que tendrán que incrementar su producción de agua potable puesto que la demanda va en aumento en el área de servicio.

Uno de los sistemas susceptibles de ser optimizado y/o ampliado es la planta Lo de Coy puesto que ya se cuenta con capacidad instalada de conducción segunda etapa del acueducto nacional Xayá-Pixcayá, actualmente la capacidad de tratamiento es de 1 m<sup>3</sup>/s caudal de estío y la capacidad instalada de conducción es 3 m<sup>3</sup>/s. En el momento que se tome la decisión de optimizar y/o ampliar la planta será necesario contar con una evaluación del funcionamiento operacional de la misma por lo que se espera que el presente trabajo sea una contribución a las evaluaciones que se tendrían que hacer previas a la ejecución de la obra.





# 1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE LO DE COY

**Figura 1. Descripción de la planta de tratamiento de agua potable Lo De Coy**

(A) UBICACIÓN	
1) País: Guatemala	2) Nombre de la planta: Lo de Coy
3) Localidades abastecidas: zonas 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 18 y 19 de la ciudad capital	
4) LOCALIZACIÓN	
Departamento: Guatemala en el municipio de Mixco	
Aldea: Lo De Coy	Cantón: <input type="text"/>
Distrito: <input type="text"/>	
5) Dirección de la planta: kilómetro 17.5 carretera a Antigua Guatemala	
Distancia de la capital: 17.5 kilómetros	Altura: 1679 msnm
6) Institución propietaria o administradora: EMPAGUA	

(B) FUENTE DE ABASTECIMIENTO	
7) FUENTES DE ABASTECIMIENTO	
<input type="checkbox"/>	Quebradas Nombre: <input type="text"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	Ríos Nombres: Pixcayá y Xayá
<input type="checkbox"/>	Lagos o embalse: Nombres: <input type="text"/>
7.1) TIPO DE TOMA	
<input checked="" type="checkbox"/>	a) Presas de toma lateral <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	b) Presa de tipo tirolés con canal de fondo
<input type="checkbox"/>	c) Otro (describa): <input type="text"/>
7.2) CONDUCCIÓN DEL AGUA CRUDA	
<input type="checkbox"/>	a) Por bombeo <input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	b) Por gravedad
7.3) DESARENACIÓN	

**Continuación**

<input checked="" type="checkbox"/>	a) Existe desarenadores para todas las fuentes de abastecimiento	
<input type="checkbox"/>	b) No existe desarenador para todas las fuentes de abastecimiento	
<input type="checkbox"/>	c) Unas fuentes tienen desarenador y otras no	
<input checked="" type="checkbox"/>	d) Área de desarenadores	
d.1) Área total del desarenador:		Número de alas o compartimientos:
Fuente de abastecimiento de desarenada:		
d.2) Área total de del desarenador:		Número de alas o compartimientos:
Fuente de abastecimiento de desarenada:		
d.3) Área total del desarenador		Número de alas o compartimientos:
Fuente de abastecimiento desarenada:		
<b>(C) CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA</b>		
8) CAUDAL DE LA PLANTA		
8.1) Caudal teórico de diseño (litros/segundo): 960		
8.2) Caudal máximo con el cual opera la planta (litros/segundo): es variable		
En la actualidad el caudal máximo varía dependiendo de la época del año, sin embargo en períodos cortos de la época lluviosa la planta ha llegado a tratar 1640 l/s debido a las necesidades de servicio.		
8.3) Caudal mínimo con el cual opera la planta (litros/segundo): (600-960)		
Indique los meses del año en que se da esta condición: el caudal de 600 l/s se da en la época de estío, y la de 960 se da en la época lluviosa.		
9) TIPO DE PLANTA		
<input checked="" type="checkbox"/>	a) Filtración rápida	
<input type="checkbox"/>	a.1) diseño patentado	Año del diseño:
Nombre de la empresa:		
<input type="checkbox"/>	a.2) Diseño de la institución	Año del diseño:
<input checked="" type="checkbox"/>	a.3) Diseño de otro organismo	Año del diseño: 1978

**Continuación**

Nombre de la empresa: CORDON Y MERIDA, INGS.		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	b) Filtración lenta
Organismo diseñador:		
c) Otros (especifique):		
<input type="checkbox"/>	c.1) Empresa u organización diseñador:	
d) Planta de tratamiento configurada con diferentes tipos de tratamiento.		
<input type="checkbox"/>	Causa:	<input type="checkbox"/> Remodelación, año
<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> Ampliación año
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	d.1) Planta con una sección de filtración lenta y otra de filtración rápida
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	d.2) Planta de filtración rápida con una sección de tratamiento para una filtración de agua cruda específica y otra u otras secciones de tratamiento para la misma u otras fuentes de agua cruda.
Describa brevemente la configuración. El detalle de las unidades se da en los párrafos siguientes:		
10.) PLANTA DE FILTRACIÓN RÁPIDA		
<input type="checkbox"/>	10.1) Dispositivo de medición de caudal	
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> a) Canal Parshall	<input type="checkbox"/> b) Vertedero
<input type="checkbox"/>	c) Otro (especifique):	
Número de dispositivos:		
<input checked="" type="checkbox"/>	10.2) Mezcla rápida	
<input type="checkbox"/>	a) Mezcladores de flujo de pistón	
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> a.1) Canal Parshall	<input type="checkbox"/> a.2) Vertedero
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> a.3) Vertedero con rampa	<input type="checkbox"/> a.6) Otros (especifique):
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> a.4) Tubo Venturi	<input type="checkbox"/> a.5) Dispersores
Número de dispositivos:		
<input type="checkbox"/>	b) Retromezcladores	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> b.1) Mecánico	<input checked="" type="checkbox"/> b.2) Hidráulico
Número de dispositivos:		

**Continuación**

Dimensiones de la cámara:		Largo	m	Ancho	m
Profundidad:		Tipo de agitador:			
m					
<input checked="" type="checkbox"/>	10.3) Floculadores				
<input checked="" type="checkbox"/>	a) Hidráulicos				
<input checked="" type="checkbox"/>	a.1) Flujo horizontal		Número de unidades: 3		
<input type="checkbox"/>	a.2) Flujo vertical		Número de compartimientos de cada floculador:		
<input type="checkbox"/>	a.3) Flujo helicoidal		Número de unidades:		
<input type="checkbox"/>	a.4) Otros (especifique):				
<input type="checkbox"/>	Número de compartimientos de cada floculador: 4				
<input type="checkbox"/>	b) Mecánicos				
<input type="checkbox"/>	b.1) Rotatorios con paletas de eje horizontal				
<input type="checkbox"/>	Número de unidades:				
<input type="checkbox"/>	Número de compartimientos de cada floculador:				
<input type="checkbox"/>	b.2) Rotatorio con paletas de eje vertical				
<input type="checkbox"/>	b.3) Con paletas oscilantes				
<input type="checkbox"/>	Número de unidades:				
<input type="checkbox"/>	Número de compartimientos de cada floculador:				
<input type="checkbox"/>	b.4) Otro (especifique):				
<input checked="" type="checkbox"/>	10.4) Sedimentadores				
<input checked="" type="checkbox"/>	a) De baja velocidad de separación				
<input checked="" type="checkbox"/>	a.1) Flujo horizontal				
<input checked="" type="checkbox"/>	Número de unidades: 4 sedimentadores con las mismas dimensiones				
<input type="checkbox"/>	a.2) flujo vertical con manto de lodos				
<input type="checkbox"/>	Describa el tipo; si es patentado, mencione la casa:				
<input type="checkbox"/>	Fabricante:				
<input type="checkbox"/>	Dimensiones de cada sedimentador:				

**Continuación**

	Sedimentador tipo 1		
	Largo: 57.8 m	Ancho: 15.9 m	Profundidad promedio: 4.20 m
	Área superficial: 919.02 m <sup>2</sup>		
	Observaciones: En la salida de cada uno de los sedimentadotes hay 4 canaletas en la superficie, que recogen el agua sedimentada a través de orificio; cada canaleta tiene 160 orificios.		
<input type="checkbox"/>	b.) De alta velocidad de sedimentación		
<input type="checkbox"/>	b.1) Pantallas inclinadas con flujo ascendente		
<input type="checkbox"/>	b.2) Tubos inclinados con flujo ascendente		
	Número de unidades:	Área de cada sedimentador:	
<input type="checkbox"/>	b.3) Otro tipo de sedimentador con flujo ascendente (describa):		
<input type="checkbox"/>	b.4) Algún tipo de sedimentador con flujo descendente (describa):		
	Número de unidades:	Área de cada sedimentador:	
<input type="checkbox"/>	b.5) Combinación de dos tipos de sedimentadotes (describalos):		
<input type="checkbox"/>	b.6) Otros tipos de sedimentadotes (describalos):		
	Número de unidades:	Área de cada sedimentador:	
<input checked="" type="checkbox"/>	10.5 Filtros		
<input checked="" type="checkbox"/>	a.) Tipo de filtro		
<input checked="" type="checkbox"/>	a.1) Flujo descendente	<input type="checkbox"/>	a.2) Flujo ascendente
	Número de unidades: 6	Área: 78.08 m <sup>2</sup>	
<input type="checkbox"/>	Tasa constante	<input checked="" type="checkbox"/>	Tasa declinante
<input type="checkbox"/>	a.3) Otro tipo (describalo):		
<input checked="" type="checkbox"/>	b.) Tipo de fondo Falso		
<input type="checkbox"/>	b.1) Boquillas o toberas	<input checked="" type="checkbox"/>	b.2) Fondo Wheeler
	Si son patentadas, indicar la casa fabricante:		
<input type="checkbox"/>	b.3) Fondo Leopold	<input type="checkbox"/>	b.4) Viguetas prefabricadas con agujero y grava de soporte

Continuación

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	b.5) Otro tipo (describalo):	
<input checked="" type="checkbox"/>	c.) Tipo de medio filtrante		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	c.1) Solo arena, indique espesor:	
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	c.2) Arena y antracita, indique espesores	Arena: 0.5m Antracita: 0.25 m
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	c.3) Otro medio filtrante (indique cual o cuales y dé su espesor):	
<input type="checkbox"/>	El medio filtrante está compuesto de antracita y arena soportada por grava.		
<input type="checkbox"/>	<b>Nota:</b> los espesores indicados en el inciso c.2 son espesores de diseño.		
<input type="checkbox"/>	10.6) Otras unidades.		
<input type="checkbox"/>	Si existen otras unidades en el tratamiento del agua, las cuales no han sido mencionadas, especifique:		
<input type="checkbox"/>	a) Tipo:	b.) Número:	c.) Descripción:
<input checked="" type="checkbox"/>	10.7) Aplicación de coagulantes.		
<input type="checkbox"/>	a.) Nombre de coagulante		
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	a.1) Sulfato de aluminio granulado	<input type="checkbox"/> a.2) Sulfato de aluminio en polvo
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	a.3) Sulfato de aluminio líquido	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	a.4) otro tipo de coagulante metálico, méncionelo: sulfato de cobre	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	b.) Forma de aplicación en seco:	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	b.1) Gravimétrico garganta oscilante	
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	b.2) Gravimétrico de tornillo sin fin	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	b.3) Gravimétrico de disco giratorio	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	b.4) Gravimétrico de banda transportadora	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	b.5) Otro tipo (describalo):	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	c.) Forma de aplicación en solución o líquido	
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	c.1) Por gravedad	<input type="checkbox"/> c.2) Con bombas dosificadoras
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	c.3) Otro tipo (describalo):	
<input type="checkbox"/>	10.8) Aplicación de ayudantes de coagulación		

**Continuación**

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	a.) Polímero sintético aniónico	<input checked="" type="checkbox"/>	b.) Polímero sintético catiónico
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	c.) Polímero sintético no iónico	<input type="checkbox"/>	d.) Otro tipo (menciónelo):
<input checked="" type="checkbox"/>	10.9) Aplicación de modificador de pH o alcalinizante			
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	a.) Cal	<input type="checkbox"/>	b.) Soda Asch
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	c.) Carbonato de sodio
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	d.) Otro (menciónelo):		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	e) Forma de aplicación		
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	e.1) Por gravedad en solución		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	e.2) Con bombas dosificadoras en solución		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	e.3) Otro tipo de dosificador (describalo):		
<input checked="" type="checkbox"/>	10.10) Aplicación de desinfectantes.			
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	a.) Al agua cruda		
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	a.1) Cloro gaseoso	<input type="checkbox"/>	a.2) Hipoclorito de calcio
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	a.3) Hipoclorito de sodio	<input type="checkbox"/>	a.4) Otro (menciónelo):
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	a.5) Forma de aplicación		
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	a.5.1) Con clorador por solución		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	a.5.2) Con clorador por alimentación directa		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	a.5.3) Por solución (hipoclorador) describalo:		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	b.5.4) Otro (especifique):		
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	b.) Al agua filtrada		
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	b.1) Cloro gaseoso	<input checked="" type="checkbox"/>	b.2) Hipoclorito de calcio
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	b.3) Hipoclorito de sodio	<input type="checkbox"/>	b.4) Otro (menciónelo):
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	b.5) Forma de aplicación		
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	b.5.1) Con clorador por solución		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	b.5.2) Clorador por alimentación directa		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	b.5.3) Por solución (hipoclorador) describalo:		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	b.5.4) Otro (especifique):		

### Continuación

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	11.) Equipo electromecánico necesario para la operación de la planta
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	a.) Equipo hidráulico <input type="checkbox"/> b.) Bombas (indique):
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	c) Compresores Indique:
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	d) Planta eléctrica de emergencia
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	e) Turbidímetro de monitoreo
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	f) Centro de control de coagulantes
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	g) Equipo sensor de fugas de cloro.
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	h) Otros (indique): Canal de agua filtrada con medidor de caudal parshall con una garganta de 7 pies. Sistema de agua de recuperación de aguas de lavado de filtros. Servicio de agua y aire bajo presión. Área administrativa y de laboratorio.
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	12.) Obras complementarias
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	a.) Tanque (especifique):de almacenamiento y distribución con capacidad de 25000m <sup>3</sup>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	b.) Estación de bombeo
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	c.) Caminos <input checked="" type="checkbox"/> d.) Estacionamientos <input checked="" type="checkbox"/> e.) Zonas verdes
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	f) Casa del jefe de planta



## 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE FLOCULACIÓN

### 2.1. Proceso de floculación

Este proceso se realiza en la planta Lo De Coy por medio de tres unidades hidráulicas, de flujo horizontal, del tipo de vuelta en punta, cada una provista de cuatro compartimientos o tramos de 16.40 metros de largo y 4.80 metros de ancho (**ver figura 16**). Las pantallas son de concreto armado y la separación entre ellas se va ensanchando gradualmente desde el inicio del primer tramo, hasta terminar en el cuarto, de tal modo que el primer tramo tiene 16 pantallas, el segundo 12, el tercero 10 y el último 8.

En estas unidades se proporciona a la masa de agua una agitación lenta que debe promover el crecimiento de los flóculos y su conservación, hasta que salgan de ella. La energía que produce la agitación del agua puede ser de origen hidráulico o mecánico.

En cada floculador, se ha considerado una canaleta parshall (parshall secundario) de 0.61 metros de ancho de garganta, con una válvula tipo mariposa de 30" de diámetro aguas arriba de la garganta, esta se utiliza para controlar el caudal de paso de cada unidad; la ecuación para medir el caudal que ingresa a cada unidad de floculación es la siguiente:

$$Q = 1.43 * H_a^{1.55} \text{ Ecu. 2.1}$$

Donde:

**Q** = caudal en metros cúbicos por segundo [ $m^3/s$ ]

**Ha** = altura en metros

Cada uno de estos parshall tiene a un lado una caja para efectuar la lectura de **H<sub>a</sub>**, con la ayuda de un limnómetro graduado en centímetros. Al evaluar la ecuación anterior con algunos datos de alturas da los valores que se presentan en la Tabla I.

**Tabla I. Aplicación de la ecuación del parshall secundario**

<b>H<sub>a</sub> (m)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/s)</b>
0.20	0.118
0.30	0.221
0.40	0.345
0.50	0.488
0.60	0.647

## **2.2. Procesos previos a la floculación**

### **2.2.1. Proceso de mezcla rápida**

Este proceso se efectúa en el resalto hidráulico que se desarrolla en el medidor Parshall de agua cruda (parshall principal), localizado en el canal de entrada. Inmediatamente aguas arriba se aplican los químicos para la floculación, por medio de difusores instalados para tal efecto.

### 2.2.1.1. Medición de caudal

#### 2.2.1.1.1. Parshall principal

Es una estructura de concreto construido en el canal de entrada con garganta de 7' (2.13m); la ecuación para calcular el caudal es:

$$Q = 5.307 * H_a^{1.6} \text{ Ecu. 2.2}$$

Donde:

$Q$  = Caudal  $[m^3/s]$

$H_a$  = Altura de agua en la caja  $[m]$

Al evaluar la ecuación anterior con algunos datos de alturas da los valores que se presentan en la Tabla II.

**Tabla II. Aplicación de ecuación del parshall principal**

$H_a$ (m)	$Q(m^3/s)$
0.10	0.133
0.20	0.404
0.30	0.773
0.40	1.225
0.50	1.751
0.60	2.344

El parshall tiene a un lado dos cajas en las cuales se hacen las lecturas de nivel de agua, en la primera se lee  $H_a$  y en la segunda  $H_b$ . En ambas cajas esta instalado un limnómetro graduado en cms.

En la caja de lectura de  $H_a$  hay instalado un sistema que genera burbujas de aire comprimido que activa dos indicadores de caudales, uno localizado en

el edificio de operaciones y otro en el edificio de administración. Estos indicadores transforman la señal de nivel de agua en lectura de caudal para su funcionamiento óptimo debe tener una presión y caudal de aire regulado. (Actualmente no funciona).

En la caja de lectura  $H_b$  está instalado un sensor de capacitancia el cual activa una bombilla roja, ubicada al lado de cada uno de los indicadores de caudal, al llegar el agua a un nivel predeterminado. (Actualmente no funciona).

El objetivo de esta señal es alertar que la relación de lectura  $H_b/H_a$  excede de 0.7, en cuyo caso el caudal indicado y obtenido por la ecuación anteriormente consignada debe corregirse. La corrección en este caso disminuye el caudal y puede hacerse empleando la siguiente ecuación.

$$C_k = - \left[ \left( \frac{H_a}{\left( \frac{1.8}{k} \right)^{1.8} - 2.45} \right)^{(4.57 - 3.14 * k)} + 0.093 * k \right] * W^{0.815} \text{ Ecu. 2.3}$$

$$k = \frac{H_b}{H_a}; W^{0.815} = 7^{0.815} = 4.88$$

Donde:

$C_k$  = Corrección al caudal en  $\left[ \frac{p^3}{s} \right]$ ; pies cúbicos por segundo

$W$  = Ancho de garganta [p]; pies.

El sulfato de aluminio se está aplicando mediante un difusor a todo lo ancho de la garganta, pero debido a la variación de caudales que trata la planta en las diferentes épocas del año, el resalto hidráulico se desplaza más allá del difusor.

#### **2.2.1.1.1.1. Dosificadores**

La planta cuenta con tres dosificadores en seco, del tipo volumétrico de 5.52 metros cúbicos, de tornillo sin fin. Dos se alternan en la aplicación del sulfato de aluminio y el tercero se usa esporádicamente para aplicar cal, cuando se requiere incrementar el **pH** del agua. Un cuarto dosificador volumétrico de 1.53 metros cúbicos de capacidad, esta destinado a la aplicación del silicofluoruro de sodio.

La planta también tiene instalaciones para aplicar polielectrolitos. Estos consisten en dos tanques de 5.5 metros cúbicos para preparar la solución y dos dosificadores volumétricos de 10.7 metros cúbicos de capacidad.

#### **2.2.1.1.1.1.1. Sustancias químicas utilizadas en la planta “Lo De Coy”**

Para el tratamiento del agua, la planta esta dosificando sulfato de aluminio, cal polielectrolitos, sulfato de cobre, hipoclorito de calcio y cloro.

- Sulfato de aluminio, actúa como coagulante. Viene envasado en bolsas de papel de 50 kg. De peso
- Sulfato de cobre, actúa como algicida. Este producto viene en bolsas de plástico de 50 kg. De peso
- Polielectrolito, actúa como ayudante de coagulación. Viene en forma líquida envasado en recipientes de plástico de color azul y 54 galones de capacidad
- Hipoclorito de calcio actúa como ayudante de desinfección. Viene en polvo envasado en cilindros metálicos con capacidad para cien libras de peso
- Cloro gaseoso, actúa como desinfectante . Este producto viene en cilindros de 2000 libras de capacidad

## **2.3. Procesos posteriores a la floculación**

### **2.3.1. Proceso de sedimentación**

Se realiza por medio de cuatro unidades convencionales rectangulares de flujo horizontal. El agua floculada ingresa a la unidad mediante una compuerta ubicada en el punto medio de la unidad y a continuación se han considerado dos cortinas perforadas. La primera tiene 51 orificios de 12" de diámetro y la segunda 204 de 6" de diámetro. Cada unidad tiene 15.9 metros de ancho, 57.80 metros de largo y 4.20 de altura útil.

La estructura de salida esta compuesta por 4 canaletas de recolección de 14 metros de largo con 160 orificios en cada canaleta distribuidos en ambos lados. Las canaletas descargan a un canal de recolección, del cual el agua sedimentada es conducida mediante una tubería de acero, hasta el canal de distribución a la batería de filtros.

La razón de haber cuatro sedimentadores en vez de tres unidades como los floculadores es de que durante la construcción de la planta se encontró una falla geológica con posibilidad de ser activa, por esta razón se tomo la decisión de acortar o reducir la dimensión de los sedimentadores y aumentar el número de estos dando un número total de cuatro en vez de tres como era originalmente. El paso sobre la falla se hizo con un tubo de acero de 48" de diámetro con juntas Dresser.

### **2.3.1.1. Canal de distribución de los sedimentadores**

Este canal recolecta el agua floculada de las tres unidades de floculación y distribuye a los cuatro sedimentadores. El canal se encuentra dividido mediante compuertas, de tal modo que el afluente de los primeros floculadores, se distribuye a dos sedimentadores y el tercer floculador a los dos sedimentadores restantes.

### **2.3.2. Proceso de filtración**

Se lleva a cabo por una batería de filtros, compuesta por seis unidades diseñadas para operar con tasa declinante y para que un filtro pueda ser lavado con flujo que produce el resto de la batería. Cada unidad tiene 78 metros cuadrados. El lecho filtrante es de arena y antracita y el drenaje es de tipo Wheeler. Están provistos de agitadores rotativos tipo Leopold para el lavado superficial. Las válvulas son de tipo mariposa con accionamiento hidroneumático y son operadas mediante consolas.

Están intercomunicadas en la entrada mediante el canal de distribución de agua sedimentada sobre el cual se encuentra dispuestas las válvulas de ingreso de 30" de diámetro. Debajo de este canal, se encuentra el canal de recolección de agua de lavado, con su correspondiente válvula de entrada.

También están interconectados en la salida, mediante un canal que además es de aislamiento, mediante la colocación de compuertas laterales. El paso del agua de retrolavado se realiza mediante una válvula de 36" de diámetro y la salida del afluente mediante otra válvula de 18" de diámetro.

### **2.3.3. Proceso de desinfección (cloración)**

El proceso de desinfección de la planta Lo De Coy esta compuesta por cuatro dosificadores de aplicación directa marca Wallace & Tiernan. Dos se alternan para la pre-cloración y otros dos para la post-cloración.

### **2.3.4. Otros componentes de la planta**

- Canal de agua filtrada con medidor de caudal parshall con una garganta de 7 pies
- Tanque de almacenamiento y distribución con capacidad de 25000m<sup>3</sup>
- Sistema de agua de recuperación de aguas de lavado de filtros
- Servicio de agua y aire bajo presión
- Generador de eléctrico de emergencia
- Área administrativa y de laboratorio



### **3. TEORÍA DE ENSAYOS**

Ya que el presente trabajo de graduación es un análisis por medio de ensayos del tiempo de retención y gradiente hidráulico del proceso de floculación de la planta “Lo De Coy” los procedimientos que se utilizarán están encaminados a determinar los parámetros mencionados.

Inicialmente se determinarán los tiempos de retención teóricos y gradientes teóricos para distintos caudales, posteriormente se obtendrán los tiempos de retención reales y los gradientes de velocidad reales, que son los parámetros con los cuales está operando actualmente la planta.

Los ensayos que servirán para la determinación de los parámetros anteriormente enunciados se derivan básicamente de los siguientes:

- Ensayo teórico (por medio de un modelo matemático)
- Ensayo práctico (ensayo con trazadores)

#### **3.1. Ensayo Teórico del tiempo de retención y gradiente de velocidad**

##### **3.1.1. Objetivo**

Determinar el tiempo de retención teórico y el gradiente de velocidad teórico.

### 3.1.2. Descripción

A través de mediciones realizadas en la planta, juntamente con datos suministrados por levantamientos planimétricos y altimétricos se calcularán los gradientes de velocidad y el tiempo de retención teóricos de los floculadores, también se desarrollará un modelo matemático de los floculadores aplicable en computadora, con la finalidad de simular las condiciones operacionales de las unidades para los caudales seleccionados (ver selección de caudales). En estas simulaciones los floculadores serán divididos en cuatro tramos debido al número de canales y a la separación entre las pantallas en cada uno de ellos, en la parte de aplicación (Capítulo 4) se incluye las Tablas XXVII y XXVIII, que resumirá las variables operacionales obtenidas para diferentes caudales utilizando un modelo matemático. En la parte de análisis se presentan las Tablas XXXV AL XXXVII, que resumen los valores de los tiempos de retención  $t$  y gradientes de velocidad  $G$  reales.

### 3.1.3. Procedimiento

- Primero.** Determinar el caudal que está pasando por la unidad midiendo la altura en el parshall secundario (ver figura 2).
- Segundo.** Medir los tirantes de agua correspondientes a los caudales determinados en el paso anterior (ver figura 3).

**Figura 2. Fotografía limnómetro del parshall secundario**



**Figura 3. Fotografía nivelación del tirante de agua**



**Figura 4. Fotografía del levantamiento topográfico de los floculadores**



**Tercero.** Determinar la pérdida de carga  $hf$ , la que se obtiene sumando la pérdida de carga en cada canal  $hf_c$  y la pérdida de carga en cada cambio de dirección o vuelta  $hf_v$  (ver figura 4), para los cálculos se utilizan las siguientes ecuaciones.

$$hf = hf_c + hf_v \quad \text{Ecu. 3.1}$$

$$hf_c = \left( \frac{n * v}{RH^{2/3}} \right)^2 * l \quad \text{Ecu. 3.2}$$

$$hf_v = \left( \frac{K * v_v^2}{2 * g} \right) \quad \text{Ecu. 3.3}$$

Donde:

$n$  = Coeficiente de pérdida de carga de Manning. Para concreto se usará un  $n= 0.013$

$v$  =Velocidad en los canales

$g$  = aceleración de la gravedad

$RH$  = Radio Hidráulico

$l$  = Longitud de total de canal

$K$  = Coeficiente de pérdida de carga en las curvas o vueltas, este puede variar entre 2 y 4, usualmente se asume 3 ó 3.5

$v_v$  = Velocidad en la vuelta

**Cuarto.** Con la nivelación del segundo paso y midiendo la sección del canal determinar el volumen en cada canal, la sumatoria de los volúmenes de los canales que conforma un tramo dará un volumen parcial, al que deberá sumársele el volumen correspondiente al espesor de las pantallas de concreto, las siguientes ecuaciones representan lo dicho (ver figura 4 y 5).

$$\nabla_{i_{canal}} = l_i * \alpha_i * h_{H_2O} \quad \text{Ecu. 3.4}$$

$$\nabla_{total} = \sum_{i=1}^{i=n} \nabla_{i_{canal}} + \sum \nabla_{pantalla} \quad \text{Ecu. 3.5}$$

Donde:

$\nabla_{i_{canal}}$  = Volumen del canal  $i$  [ $m^3$ ]

$\nabla_{total}$  =Volumen total del tramo [ $m^3$ ]

$\nabla_{pantallas}$  = Volumen total correspondiente a la franja de agua entre las pantallas

$n$  = número de canales por tramo

$l_i$  = longitud del canal. [m]

$\alpha_i$  = Ancho del canal. [m]

$h_{H_2O}$  = Altura del tirante de agua para un caudal  $Qx$ . [m]

**Figura 5. Dimensionamiento de la sección de canal**



**Quinto.** Determinar el tiempo teórico de retención por medio de la ecuación.

$$t = \frac{\nabla}{Q} \text{ Ecu. 3.6}$$

Donde:

$t$  = tiempo teórico de retención (s)

$\nabla$  = Volumen ( $m^3$ )

$Q$  = Caudal ( $m^3/s$ )

**Sexto.** Calcular el gradiente de velocidad por medio de la ecuación del gradiente.

$$G = \sqrt{\frac{\gamma * Q * hf}{\mu * \nabla}} = \sqrt{\frac{\gamma * hf}{\mu * t}} \quad \text{Ecu. 3.7}$$

Donde:

**G** = Gradiente de velocidad

**hf** = Perdida de carga

**$\gamma$**  = Peso específico del agua. A una temperatura **T** en °C en la cual se esta realizando en ensayo

**t** = Tiempo de retención teórico

**$\mu$**  = Viscosidad absoluta del agua. A una temperatura **T** en °C en la cual se esta realizando en ensayo

**$\nabla$**  = Volumen de la unidad de floculación o tramo en análisis

**Q** = Caudal que ingresa a la unidad.

La viscosidad  **$\mu$** , y el peso específico  **$\gamma$** , dependen de la temperatura en el instante de efectuarse el ensayo.

## 3.2. Teoría de ensayo con trazadores

### 3.2.1. Objetivo

Determinar el tiempo de retención real y el gradiente de velocidad real de operación.

### 3.2.2. Descripción

Es conocido el método de aforo por medio de trazadores y se aplica a menudo para determinar el flujo en canales, ríos o reservorios.

En plantas de tratamiento su uso ha sido limitado, pero es muy útil para determinar la distribución del flujo de reactores paralelos y evaluar la eficiencia hidráulica y configuración de unidades de distribución, entrada y recolección de agua en reactores; actualmente son utilizados principalmente para definir los tiempos reales de retención y sus principales características relacionadas: tipos de flujo, espacios muertos y cortocircuitos en las unidades de tratamiento, tales como mezcladores, floculadores y sedimentadores, así como en modelos de reactores en etapa de diseño para conocer su comportamiento hidráulico y deficiencias en forma previa a su construcción, lo cual es de enorme utilidad práctica.

### **3.2.3. Tipos de ensayos con trazadores**

Se agregan sustancias llamadas trazadoras con una concentración conocida, en el afluente o efluente de la unidad que se quiere analizar, para determinar la salida del mismo, la forma como dicha concentración se distribuye a través del tiempo se determina en que forma está operando la unidad, espacios muertos, tipos de flujo cortos circuitos y otras características hidráulicas deseadas.

La adición de trazadores puede hacerse de maneras distintas:

#### **3.2.3.1. En forma continua**

Para este caso se aplica un peso de trazador con una concentración  $C_o$ , por un tiempo no menor de tres veces el tiempo de retención nominal, y luego se interrumpe bruscamente la dosificación.



La forma continua tiene la ventaja de permitir establecer comparaciones entre las curvas que se presentan a la entrada del trazador (cuando se inicia la dosificación) y al final (cuando se concluye la misma). Además se obtiene una concentración de equilibrio.

La cantidad del trazador  $P$  [kg/hora] esta dada por la siguiente ecuación.

$$P = \frac{3600 * C_o * Q}{I * 10^3} \quad \text{Ecu. 3.8}$$

$$P = \frac{3.6 * C_o * Q}{I} \quad \text{Ecu. 3.9}$$

Donde:

$P$  = Peso del trazador [kg/hora]

$C_o$  = Concentración del trazador [mg/l]

$I$  = Grado de pureza del trazador (fracción de unidad)

La toma de muestra en la salida de la unidad que se esta evaluando debe extenderse por un periodo de tiempo hasta obtener por lo menos tres ensayos consecutivos al valor de la concertación  $C_o$ .

Debido a que la planta "Lo De Coy" carece de equipo de dosificación continua para la realización de este ensayo en los parshall secundarios, se tomó la decisión de realizar el ensayo de trazadores con el procedimiento en forma instantánea. (El único punto que contiene dosificación continua esta antes del proceso de mezcla rápida).

### 3.2.3.2. En forma instantánea

En este caso se aplica una concentración  $C_o$  a la entrada del floculador en un tiempo muy corto, inferior a 1/30 del tiempo teórico de retención  $t$ , en un punto en que se mezcle instantáneamente con la masa de agua que se piense analizar.

En la dosis instantánea la concentración  $C_o$  que se escoja debe ser tal que se pueda determinar con facilidad en el agua, por medio del siguiente criterio:

$$P = \frac{V * C_o}{I * 10^3} \quad \text{Ecu. 3.10}$$

Donde:

$P$  = Peso de trazador a añadir al reactor [kg]

$V$  = Volumen del reactor [ $m^3$ ]

$C_o$  = Concentración [mg/l]

$I$  = Grado de pureza del trazador (fracción de unidad)

#### 3.2.3.2.1. Materiales utilizados en la prueba de trazadores

- Trazador. (Dióxido de calcio)
- 1 aparato para determinar (Potenciómetro)
- Vasos para toma de muestras
- 1 depósito con una capacidad de 54 galones
- 2 tomadores de muestras a profundidad (ladrones)
- 1 cronometro
- 2 tablonas
- 2 mangueras de cien pies

– Marcadores

**Figura 6. Fotografía de la secuencia del ensayo de trazadores en el caso instantáneo**



Dilución del trazador



Vertido del trazador



Ingreso del trazador a la unidad de floculación



Recorrido del trazador en la unidad de floculación

En las fotografías que se presentan en la figura 6, se presenta de la secuencia del ensayo de trazadores en el caso instantáneo.

### **3.2.3.2.2. Procedimiento para realizar en el ensayo de trazadores**

Como se indicó en secciones anteriores, la sustancia trazadora utilizada fue cal hidratada, y el parámetro a medir sería el potencial de hidrogeno (**pH**). Como la variación del potencial de hidrogeno es logarítmica, no se puede utilizar directamente este dato, por lo que se debe elaborar una curva de calibración para determinar cuantos miligramos por litro de cal hidratada es necesario aplicar para variar el **pH** en una unidad.

Antes de iniciar el ensayo de trazadores se deben seguir los siguientes pasos:

**Primero.** Antes de iniciar el ensayo con trazadores se debe de tomar una muestra de agua a la entrada del floculador, la cual le servirá para determinar la curva de calibración. El volumen necesario para la muestra puede ser como mínimo de 1 litro, pudiéndose utilizar un vaso de precipitado con esa capacidad, este tipo de vaso es del mismo tipo que se utiliza para realizar las pruebas de jarras.

**Segundo.** Con la muestra obtenida se debe hacer variar el **pH**, dosificando con una solución de cal al 1%, de tal manera que se debe aplicar 10mgr/l por cada medición de **pH**, este procedimiento se debe hacer por lo menos para obtener 20 puntos de la curva de calibración.

**Tercero.** Después de haber concluido de tomar la lectura del **pH** para cada dosificación, se debe utilizar el método de mínimos cuadrados, para encontrar la ecuación de la recta correspondiente a los datos anteriores. Se puede dibujar la curva en papel semilogarítmico, colocando en el eje de las abscisas el **pH** (escala aritmética) y en el eje de las ordenadas la dosis (escala logarítmica). La ecuación de la recta será de la forma  $\log(y) = a * x + b$  donde a y b son constantes propias de la ecuación.

**Cuarto.** Luego de verter el trazador se debe tomar muestras a la salida de la unidad, y a cada muestra se le debe de medir el **pH**. En una hoja de control se debe anotar el **pH** de la muestra y el tiempo en el que fue tomada. Por medio de la curva de calibración se determina una ecuación que convierte el valor de **pH** a concentración de cal hidratada (mg/l).

Después de realizado lo anterior, se procede a iniciar el ensayo de trazadores, teniendo en cuantas los siguientes pasos:

**Primero.** Selección de los caudales para la realización del ensayo.

**Segundo.** Establecer el tiempo en que se tomaran las muestras, numerar las probetas o vasos en los que se colocara la muestra. Se debe indicar donde fue extraída la muestra.

**Tercero.** Determinar el peso del trazador a utilizar.

**Cuarto.** Hacer la solución en el depósito de 54 galones.

**Quinto.** Verter la solución en el parshall a la entrada del floculador.

**Sexto.** Luego de vertido el trazador se comienza a tomar muestras a la salida de la unidad o tramo establecido. Se debe tomar muestras de agua a una profundidad aproximada de 50 centímetros, con un

extractor de muestras (ladrón), la toma de muestras se hace en el periodo de tiempo establecido en el quinto paso.

**Séptimo.** Con el tiempo de retención teórico obtenido del mismo ensayo, se ha determinado el tiempo que tarda en pasar el flujo en un determinado tramo o unidad, de esta manera se tiene noción de en que minuto el flujo esta saliendo de estos, el **to** le servida para tomar la muestra en la salida de del tramo o unidad en análisis en el instante aproximado de la salida del flujo.

**Octavo.** El ensayo se da por finalizado cuando, el parámetro en estudio se estabilice, es decir que permanezca constante e igual al valor determinado inicialmente en el agua cruda.

#### **3.2.4. Sustancias trazadoras**

Las sustancias trazadoras pueden ser:

- Colorantes como fluoresceína o rodamina
- Iones como cloruros, fluoruros o nitratos, especialmente el de sodio
- Elementos reactivos como isótopos
- Ácidos: Clorhídricos, benzoico
- Otras sustancias químicas: Alizarim, Sapirol, Naftol y Cal Hidratada

El uso de cloruros o fluoruros es más sencillo que el de radioisótopos y las pruebas pueden realizarse sin mucho problema.

El uso de radioisótopos, a pesar de ser un sistema bastante sofisticado, tiene grandes ventajas.

- Es mucho más preciso pues los detectores de radiación son más sensibles.
- La determinación de los trazadores pueden hacerse en forma continua son necesidad de recolectar muestras.
- Puede efectuarse aun en casos en que no se tiene acceso al interior del sistema. Pues la radiación puede ser medida a través de determinado tipo de materiales.
- Se adapta mejor a las investigaciones.

Una de las grandes desventajas de este sistema es que requiere utilizar equipo y personal especializados.

Antes de elegir el tipo de trazador que se va a utilizar, se debe verificar la concentración de estas sustancias en el agua cruda y seleccionar aquellas que se presentan en concentraciones constantes o muy bajas.

Es conveniente además escoger como trazador aquella sustancia que no reaccione con los compuestos que existen en el agua, y que por lo tanto la concentración total que se determina a la salida sea sensiblemente igual a la que se aplique en la entrada. Esta es la razón por la cual iones como el cloro son malos trazadores. Por supuesto, en casi todos los casos hay que esperar que se pierda algo de trazador.

### **3.2.5. Limitaciones de las pruebas con trazadores**

Las pruebas de trazadores son muy útiles para conocer como se desplazan las diferentes masas de agua dentro de las unidades de tratamiento, pero los datos obtenidos se refieren solamente al momento en que se hace la prueba, y no representan necesariamente el comportamiento en todas las condiciones.

Por otra parte, tampoco dicen nada sobre la eficiencia en la desestabilización o remoción de partículas, pues estos dependen no solo de las características hidráulicas de los reactores sino también de las químicas.

Es importante recalcar que este tipo de análisis no determina tampoco las trayectorias de las partículas del flujo o como este se distribuye en el reactor, indicando su tiempo de permanencia pero no su trayectoria.

Se debe, además, realizar las siguientes consideraciones para obtener resultados significativos:

- El flujo debe ser “constante” durante un lapso superior a por lo menos tres veces la duración del ensayo
- El flujo debe ser segregado, es decir, que el flujo que entra en la unidad no se mezcle con el flujo de otras unidades
- Si el reactor contiene lodos depositados puede producir interferencias, especialmente en la comprobación de las ecuaciones de balance de masa, por lo cual deberá ser previamente limpiado
- Es conveniente estabilizar el reactor para evitar interferencias para lo cual se puede dosificar continuamente pequeñas cantidades de trazador, por un periodo de tiempo igual al del ensayo antes y después de la evaluación
- Curvas resultantes del ensayo de trazadores en el mismo reactor deben tener igualdad de resultados, especialmente en lo relacionado con el tiempo inicial de presentación del trazador, y de máxima concentración, valores de constricción máxima y áreas bajo la curva
- Se podría utilizar, con fines comparativos, curvas de reactores diferentes o pruebas diferentes en un mismo reactor utilizando valores adimensionales



### **3.3. Teoría de modelo de flujos**

#### **3.3.1. Introducción**

En esta parte del documento **Análisis por medio de ensayos del tiempo de retención y gradiente hidráulico del proceso de floculación de la planta de tratamiento de agua potable “Lo De Coy”**, se presentan los conceptos que le servirán para analizar los distintos de tipos de flujo que afectan a un reactor, estos son de importancia ya que muchas plantas de tratamiento de agua no tienen la eficiencia esperada por deficiencias hidráulicas que ocasionan diferentes distribuciones de flujo y afectan los periodos de retención del agua.

#### **3.3.2. Modelos de flujo**

En las unidades de tratamiento, desde el punto de vista hidráulico, el flujo del líquido puede ser discontinuo o intermitente y continuo, (ver Tabla III).

#### **3.3.3. Modelos de flujo intermitente**

El flujo de tipo intermitente o discontinuo, es el menos habitual, consiste en llenar la unidad, dejar un tiempo el líquido en ella mientras se produce el proceso correspondiente, que puede realizarse con o sin mezcla, vaciar la unidad y repetir el ciclo.

En la mayoría de los casos esto no es práctico y generalmente los procesos son de flujo continuo, salvo que el proceso de tratamiento en si exija la discontinuidad, o se trate de experiencias piloto o pruebas de laboratorio.

Un ejemplo de este tipo lo constituye la prueba de jarras, en la cual los vasos de precipitación se llenan con un volumen  $\forall$  de líquido y se someten a un proceso de tratamiento durante un tiempo de retención  $t_o$ , al terminar se vacían y se preparan para una nueva prueba. En la realidad toda la masa líquida permanece en el reactor todo el tiempo de retención.

### **3.3.4. Modelos de flujo continuo**

También se pueden clasificar, desde el punto de vista hidráulico, en: modelo de flujo de pistón y mezclado.

#### **3.3.4.1. Modelo de flujo de pistón**

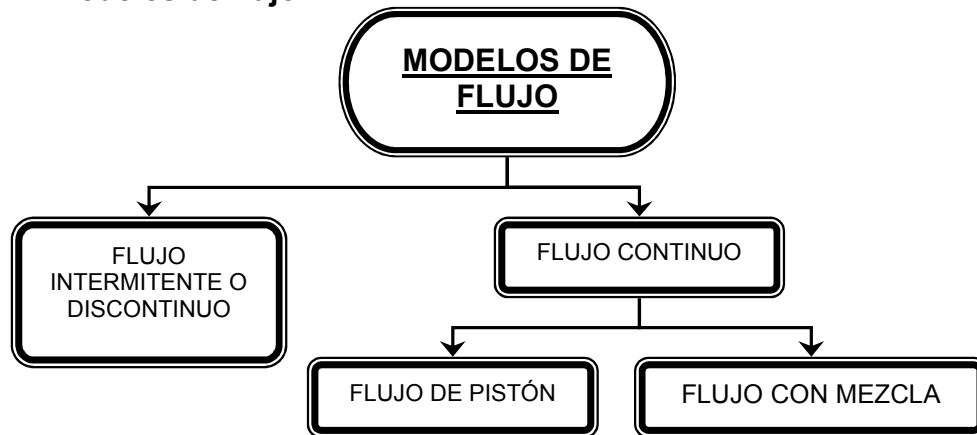
Es aquel en que las partículas del fluido que entran a la unidad permanecen en ella el mismo tiempo. De esta manera los elementos del fluido pasan a través del sistema y son descargados en la misma secuencia en que fueron introducidos y no hay ningún tipo de mezcla entre el fluido que ingresa y el fluido que está en la unidad. En la práctica es muy difícil lograr un flujo con estas características.

#### **3.3.4.2. Modelos de flujo con mezcla**

Implican una mezcla parcial o total del fluido entrante con el fluido que está en la unidad. Un ejemplo de esto lo constituyen las unidades de floculación y sedimentación.

En la Tabla III se resumen los tipos de flujo desde el punto de vista hidráulico.

Tabla III. Modelos de flujo



### 3.4. Influencia del factor tiempo de retención

Tradicionalmente se ha empleado en el diseño de los reactores utilizados en plantas de tratamiento de agua el parámetro denominado “tiempo o período de retención”.

Puesto que las operaciones y procesos ocurren en general lentamente, es necesario un período de reacción prolongado o un periodo de contacto largo para lograr la transferencia y/o reacciones necesarias. Es importante destacar que conviene que esto se verifique para cada una de las partículas del fluido y para cada uno de los elementos que conformen las impurezas.

Se define por tiempo medio de retención o permanencia  $t_o$  del flujo en una unidad a la relación de:

$$t_o = \frac{V}{Q} \quad \text{Ecu. 3.11}$$

Donde:

$t_o$  = tiempo medio de retención

$\forall$  = volumen de la unidad

$Q$  = caudal

La permanencia es un concepto abstracto puede definirse como: el tiempo promedio en que el fluido de caudal  $Q$  que pasa a través del reactor del volumen  $\forall$ .

Es así mismo, el tiempo que tardaría una partícula cualquiera del fluido en entrar y salir de la unidad en el caso en que todas las partículas del fluido evolucionaran en la misma forma dentro de esa unidad. Cabe indicar que el caso correspondería al flujo estable ideal.

En la práctica es difícil que esto ocurra, ya que las condiciones hidráulicas del flujo (regiones o zonas muertas, corrientes de inercia, cortocircuitos y otros) hacen imposible las condiciones de flujo estable.

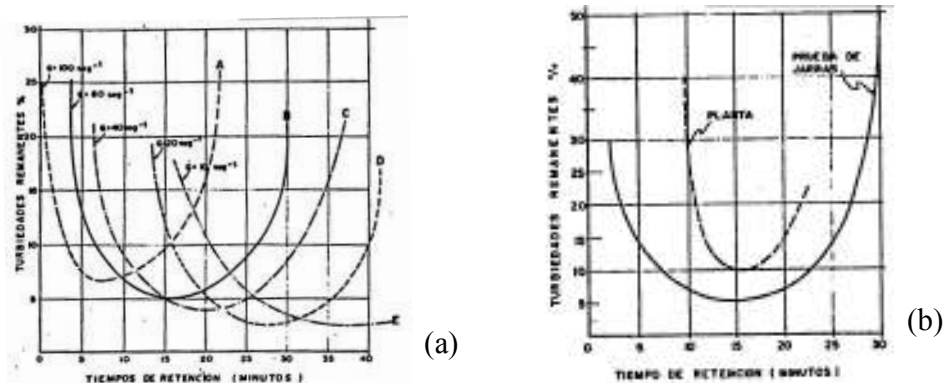
La magnitud de la permanencia es variable, por ejemplo es del orden de segundos en la aeración por difusión, de minutos en los lechos percoladores y filtros rápidos, de horas en las unidades de lodos activados, de días en la purificación natural de aguas superficiales, de semanas en la digestión anaerobia de lodos de aguas servidas y de meses aun de años en la estabilización vendal de depósitos en lagos y en el mar.

En otras palabras el tiempo de retención por lo general en los reactores es distinto para las diferentes fracciones del volumen  $\forall$  que entra en el tiempo  $t=0$ . Es necesario, por lo tanto, estudiar la distribución del tiempo de retención en el reactor, para poder conocer la forma que ha quedado sometida la masa líquida a un determinado tratamiento.

La importancia de la influencia del tiempo de retención en la eficiencia de una unidad de floculación lo demuestran los resultados de la evaluación de una planta de tratamiento de agua potable en América Latina. En la figura 7, se representan las eficiencias teóricas (prueba de jarras) en función de los gradientes de velocidad y tiempos de retención, presentando todas las curvas puntos de máxima eficiencia; cualquier variación del tiempo de retención en menos (cortocircuitos) o en más (espacios o zonas muertas) produce apreciables disminuciones en la eficiencia, fenómenos que es más importante cuando mayor es el gradiente de velocidad utilizado.

Analizando la curva (B) de la figura 7 que corresponde a un gradiente de velocidad de  $80 \text{ s}^{-1}$  se presenta la máxima eficiencia remocional (95%) en los 15 minutos de tiempo de retención; con 10 y 20 minutos de retención disminuye la eficiencia a 92.5% y 93% respectivamente. Al reproducir en la planta condiciones similares, se produjeron en primer lugar eficiencias menores (90%) y en segundo lugar, mayor influencia de la variación del tiempo de retención presentando eficiencias de 64% para un tiempo de retención de 10 y 20 minutos respectivamente, (ver figura 7).

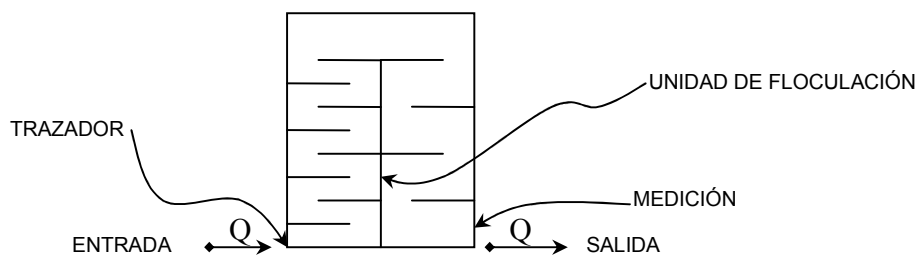
**Figura 7. a) Influencia del periodo de retención en la eficiencia de la floculación (Prueba de Jarras).  
b) Influencia del periodo de retención en la eficiencia teórica (Prueba de Jarras) y real en la Floculación**



### 3.5. Uso de trazadores para determinar el tiempo de retención y características hidráulicas de un reactor

Para visualizar el funcionamiento de una unidad desde el punto de vista hidráulico, es conveniente utilizar una sustancia trazadora (sal, cal, un colorante o una sustancia reactiva) que pueda inyectarse en la entrada de la unidad y simultáneamente, se comenzara, a registrar la concentración del trazador a la salida.

**Figura 8. Uso de trazador en la unidad de floculación para la evaluación de su funcionamiento (floculador del tipo de vuelta en punta)**



En la figura 8, se presenta el uso de trazadores en una unidad de floculación que se someterá a una evaluación.

La inyección del trazador puede hacerse en forma continua o en forma instantánea, en la práctica en un intervalo de tiempo  $\Delta t_0$ .

#### 3.5.1. Inyección instantánea

En este caso la concentración inicial  $C_0$  del trazador permanece constante durante el breve tiempo de inyección  $t_0$ .

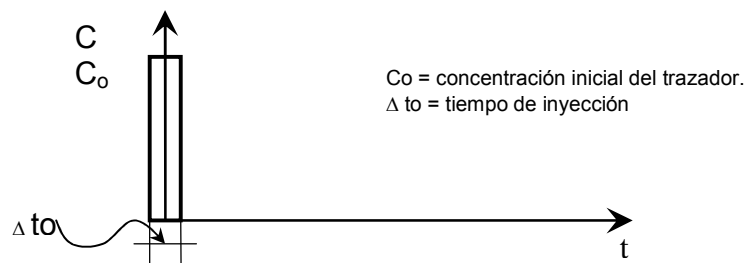
En caso de una unidad bajo condiciones reales de funcionamiento (o sea con cierto grado de mezcla, cortocircuitos, regiones o zonas muertas, corrientes

de inercia, y otros) al graficar la concentración del trazador a la salida en función del tiempo, se obtiene una curva del tipo de la indicada en la figura 10.a.

Sumando los valores de la concentración se obtiene una segunda curva denominada  $F(t)$ , figura 10.b la cual representa la fracción de la totalidad del trazador que ha llegado a la salida de la unidad.

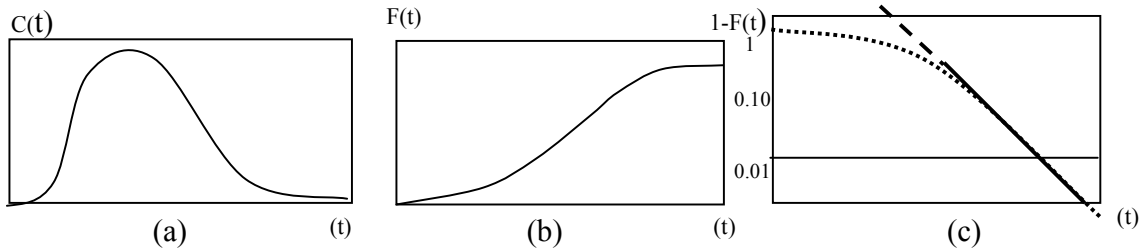
En la figura 9 se presenta una representación de la concentración del trazador en función del tiempo a la entrada y durante la inyección de la sustancia trazadora.

**Figura 9. Representación de la concentración del trazador en función del tiempo a la entrada y durante la inyección de la sustancia trazadora**



Al graficar el valor del logaritmo de los valores de  $F(t)$  de esta segunda curva con los valores de  $(t/t_0)$ , siendo  $t$  el tiempo en el cual se toma la muestra de la salida del reactor y  $t_0$  el tiempo teórico de retención, se obtiene una curva que presenta una tendencia recta figura 10.c la cual es muy útil para la determinación de características principales concomitantes al tiempo de retención, es decir de flujo producido: Pistón, mezclado, y zonas muertas.

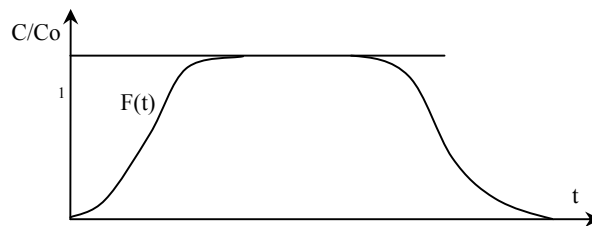
**Figura 10. Concentración de trazador en efluente de un reactor (aplicación instantánea)**



### 3.5.2. Inyección Continua

Para el caso de inyección continua el tipo de curva que se obtiene es el indicado en la figura 11.

**Figura 11. Inyección Continua**



## 3.6. Características físicas que afectan a un reactor

### 3.6.1. Introducción

En esta parte del capítulo se presenta las características físicas que afectan a un reactor, estas características que le servirán para poder analizar, los resultados obtenidos producto de los ensayos con trazadores.

Se presentan varios criterios para el análisis de los resultados que se obtengan en las pruebas con trazadores, posteriormente concluirá y se determinará que tipo de fenómenos están afectando a la unidad en análisis.



### 3.6.2. Análisis de las características de un reactor

Se utilizan los siguientes procedimientos para evaluar las características hidráulicas de un reactor:

- Modelos matemáticos, especialmente el desarrollado por Wolf y Resnick.
- Análisis de la curva de tendencia (curva de Gauss) y su correlación con las características hidráulicas.

### 3.6.3. Modelo simplificado de la teoría de Wolf-Resnick

Es evidente que cuando no hay espacios muertos, la fracción de flujo de pistón ( $p$ ) y la fracción de flujo ( $1-p$ ) deben ser igual a la unidad:

**Flujo de pistón + Flujo de no pistón = 1**

$$p + (1 - p) = 1 \quad \text{Ecu. 3.12}$$

Cuando hay espacios muertos, si ( $m$ ) es la fracción del volumen considerado como espacio muerto o zona muerta, la fracción efectiva será a ( $1-m$ ) y por lo tanto:

Flujo de pistón + flujo de no pistón + espacios muertos = 1

$$[p*(1-m)] + [(1-p)*(1-m)] + m = 1 \quad \text{Ecu. 3.13}$$

Ahora bien, se estableció que para flujo perfectamente mezclado es igual a:

$$\frac{C}{C_o} = e^{\frac{-t}{t_o}} \quad \text{Ecu. 3.14}$$

Si se considera que en el reactor se presenta una combinación de flujos de pistón y mezclado, la ecuación 3.14 se transforma en:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{t-p*t_0}{(1-p)*t_0}} \quad \text{Ecu. 3.15}$$

En la que ( $p*t_0$ ) es el tiempo de retención correspondiente a flujo de pistón y ( $1-p$ ) es el volumen de mezcla perfecta. Reordenando y simplificando se obtiene:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{1}{(1-p)} * \left[ \frac{t}{t_0} - p \right]} \quad \text{Ecu. 3.16}$$

Si se considera que el sistema además tiene espacios muertos, habría que introducir en la última ecuación el término ( $1-m$ ) para considerar la fracción efectiva de flujo con mezcla perfecta, de esta manera se obtendrá:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{1}{(1-p)*(1-m)} * \left( \frac{t}{t_0} - p*(1-m) \right)} \quad \text{Ecu. 3.17}$$

La fracción de la totalidad del trazador que ha llegado a la salida del reactor será:

$$F(t) = 1 - \frac{C}{C_0} \quad \text{Ecu. 3.18}$$

Reemplazando el valor de  $\frac{C}{C_0}$  se obtiene:

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{1}{(1-p)*(1-m)} * \left( \frac{t}{t_0} - p*(1-m) \right)} \quad \text{Ecu. 3.19}$$

Reordenando la ecuación y tomando los logaritmos de ambos términos se llega a:

$$\log(F(t)) = \frac{-\log * e}{(1-p) * (1-m)} * \left( \frac{t}{t_0} - p(1-m) \right) \quad \text{Ecu. 3.20}$$

que corresponde a la ecuación de una línea recta, cuya pendiente esta dada por:

$$\text{tag}(\alpha) = \frac{\log * e}{(1-m) * (1-p)} \quad \text{Ecu. 3.21}$$

El valor  $-\log * e / [(1-m)*(1-p)]$  se puede encontrar dibujando en papel semilogaritmico  $[1-F(t)]$  en las ordenadas y  $t/t_0$  en las abscisas, con lo que resulta una línea recta que forma un ángulo con la horizontal. Esta línea se

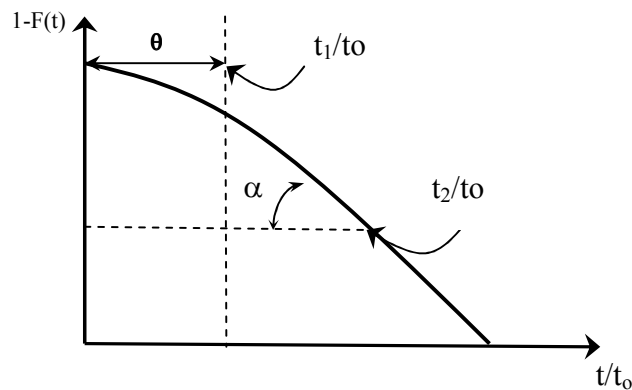
encontró que tiene una pendiente diferente a  $-1$  y no pasa por el origen, como sucedería de haber mezclado perfectamente. La ecuación 3.18 podría entonces describirse así:

$$\log[1 - F(t)] = -t(\alpha) * \left(\frac{t}{t_0} - \theta\right) \quad \text{Ecu. 3.22}$$

Donde:  $\theta = p(1 - m)$  y

$$\begin{aligned} \text{tg}(\alpha) &= \frac{\log^* e}{(1 - m) * (1 - p)} \Rightarrow \text{tg}(\alpha) = \frac{0.43429 * p}{(1 - m) * (1 - p) * p} \Rightarrow \\ \text{tg}(\alpha) &= \frac{0.43429 * p}{\theta * (1 - p)} \quad \text{Ecu. 3.23} \end{aligned}$$

**Figura 12. Curva de  $1-F(t)$  vrs.  $t/t_0$  cantidad de trazador que permanece en el reactor**



En la figura 12 se presenta la curva que representa la cantidad de trazador que permanece en el reactor.

El valor  $[1-F(t)]$  es la fracción del flujo que sale en un tiempo mayor de  $t_0$  y es igual al  $1-C/C_0$  cuando se empieza la dosificación del trazador (rama ascendente de la curva) y a  $C/C_0$  cuando se suspende bruscamente (rama

descendente de la curva). De la ecuación 3.23 se puede despejar  $p$  de esta manera nos da la siguiente expresión.

$$\begin{aligned} \theta * \operatorname{tg}(\alpha) - \theta * \operatorname{tg}(\alpha) * p &= 0.43429 * p \\ \theta * \operatorname{tg}(\alpha) &= p * (0.43429 + \theta * \operatorname{tg}(\alpha)) \\ p &= \frac{\theta * \operatorname{tg}(\alpha)}{0.43429 + \theta * \operatorname{tg}(\alpha)} \quad \text{Ecu. 3.24} \end{aligned}$$

De esta manera el flujo mezclado sería:

$$m = (1 - p) \quad \text{Ecu. 3.25}$$

$$m = 1 - p - M \quad \text{Ecu. 3.25.1}$$

Los espacios muertos estarían dados por:

$$M = 1 - \frac{\theta}{p} \quad \text{Ecu. 3.26}$$

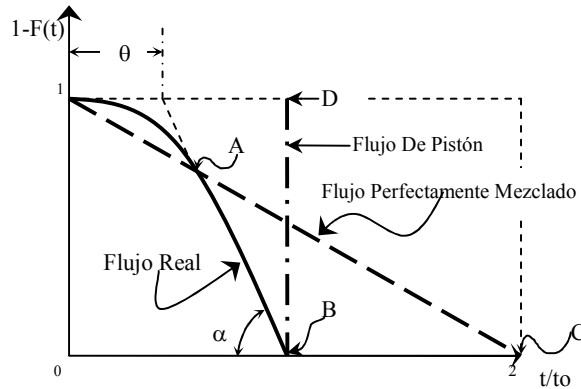
Si  $[1-F(t)]$  lo hacemos igual a 1, en la ecuación 11,  $\log[1-F(t)]=0$ , entonces:

$$\theta = \operatorname{tg}(x) * \left[ \frac{t}{t_0} - \theta \right] \quad \text{Ecu. 3.27}$$

Por lo tanto (ver la figura 13) para  $[1-F(t)]=1$ , se obtiene que  $t/t_0=\theta$ , valor que puede hallarse prolongando la línea A-B. En consecuencia, si conocemos los valores de  $C$  para una sucesión de tiempos  $t$ , se puede hallar la pendiente y con ella el valor de  $\theta$ ,  $p$  y  $m$ .

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{1}{\frac{t_2}{t_0} - \frac{t_1}{t_0}} \quad \text{Ecu. 3.28}$$

**Figura 13. Determinación de la pendiente y los valores  $\theta$ ,  $p$  y  $m$**



Llamando  $n = \frac{1}{(1-p)(1-m)}$  al coeficiente que caracteriza la eficiencia

de la mezcla. La ecuación básica de Resnick se puede escribir.

$$F(t) = 1 - e^{\left[-n^*(t - \frac{\theta}{t_o})\right]}$$

La anterior expresión constituye la ecuación básica de Wolf-Resnick. Los valores  $n$  y  $\theta$  definen las características del flujo en el reactor, presentándose los posibles valores en el cuadro siguiente:

**Tabla IV. Características del flujo en el un reactor determinado**

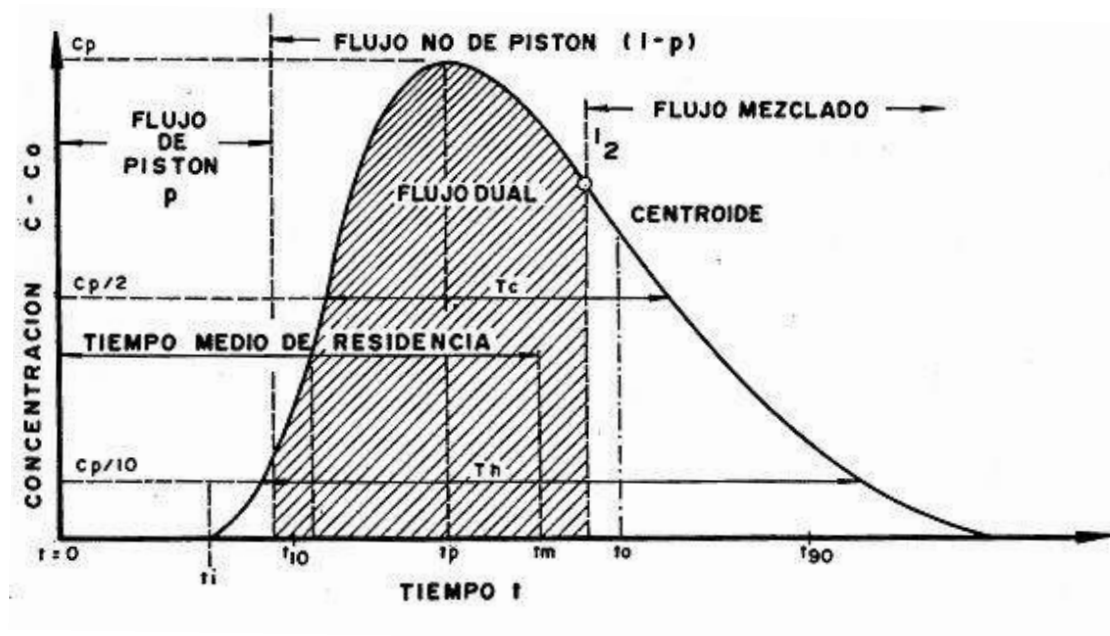
CONDUCCIÓN DEL FLUJO EN EL REACTOR	$n$	$\theta/t_o$
Mezcla perfecta	1	0
Mezcla con flujo ideal	>1	>0
Mezcla con espacios muertos	>1	0
Mezcla con cortocircuitos	<1	<0
Mezcla con error en tiempo de aplicación	<1	0
Mezcla con atraso	1	>0

### 3.6.4. Análisis de la curva de tendencia de concentración del trazador

Ha sido práctica común establecer la eficiencia hidráulica de un reactor analizando la tendencia de la curva de concentración del trazador y relacionar sus diferentes parámetros con condiciones de flujo.

Al aplicar trazadores a un reactor y analizar las muestras de agua tomadas a la salida, se obtiene una serie de valores de concentración que aumenta con el tiempo hasta llegar a un máximo y luego disminuyen progresivamente, originando una curva tal como se indica en la figura 14. En la Tabla V, se presentan algunos parámetros de importancia.

Figura 14. Curva de tendencia de concentración del trazador



**Tabla V. Parámetros principales de la curva de tendencia de concentración del trazador**

VARIABLE	ENUNCIADO
$t_1$	Tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente.
$t_{10}$	Tiempo correspondiente al paso del 10% de la cantidad total del trazador.
$t_p$	Tiempo modal, correspondiente a la presencia de la máxima concentración.
$t_m$	Tiempo medio, correspondiente al paso del 50% de la cantidad total del trazador.
$t_o$	Tiempo medio de retención o tiempo teórico de retención = $V/Q$ .
$t_{90}$	Tiempo correspondiente al paso del 90% de la cantidad total del trazador.
$t_f$	Tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador al reactor.
$C_o$	Concentración inicial
$C_p$	Concentración máxima a la salida.

Se pueden utilizar los siguientes criterios:

- (a) Esta relación mide los circuitos grandes. Es igual a 1 para el flujo de pistón e igual a cero para flujo ideal de mezcla.

$$\frac{t_i}{t_o} \text{ (a)}$$

Si el valor de la relación es  $< 0.3$  puede significar que existe paso directo del trazador entre la entrada y la salida (cortocircuito).

- (b) Si esta relación es menor que la unidad existen cortocircuitos. Si es mayor hay errores experimentales o existen zonas en donde el trazador haya quedado retenido en un cierto tiempo (zonas muertas), y luego haya ido saliendo lentamente, con lo que la rama

descendente de la curva presenta una forma alargada, que desplaza el centroide del área y aumenta el valor de  $t_m$  ( $t_{50\%}=tm$ ), haciendo  $t_m > t_o$ . Normalmente  $t_m = t_o$ , esto indica que el tiempo  $tr = tm$ , por lo que se tomará este criterio para realizar el análisis de los caudales en estudio (ver selección de caudales en la sección 4.1.1.).

$$\frac{t_m}{t_o} \text{ (b)}$$

- (c) Esta expresión indica la relación de flujo de pistón y flujo mezclado. Cuando es igual a 1 existe únicamente flujo de pistón y 0 para flujo mezclado; cuando la relación  $t_p/t_o$  se aproxima a 1 ( $t_p/t_o > 0.50$ ), se puede concluir que existe predominio de flujo de pistón y cuando se aproxime a 0 ( $t_p/t_o \leq 0.50$ ) esto indica que existe predominio de flujo mezclado.

$$\frac{t_p}{t_o} \text{ (c)}$$

- (d) Esta expresión esta relacionando en general con la difusión debida a corrientes de inercia (turbulencia). Es igual al cociente  $\Delta t_o/t_o$  (razón del tiempo de inyección) para el flujo estable ideal, y aproximadamente desorden de 0.7 para flujo mezclado ideal.

$$\frac{t_c}{t_o} \text{ (d)}$$

- (e) Esta expresión esta relacionada con las corrientes de inercia turbulentas y de recirculación grande. Es igual al cociente de  $\Delta t_o/t_o$  (razón de tiempo de inyección), para el flujo estable ideal y aproximadamente desorden de 2.3 para flujo mezclado ideal.



$$\frac{t_b}{t_o} \text{ (e)}$$

(f) Este criterio expresa la excentricidad de la curva y por lo tanto es función de la recirculación. Es igual a cero para flujo de pistón y 2.3 para mezcla ideal.

$$e = \frac{(t_f - t_p) - (t_p - t_i)}{t_o} \text{ (f)}$$

#### (h) Índice de Morril

Se encontró que al acumular los datos sobre cantidad de trazador que pasa, expresado en % y dibujando en papel que tenga escala de probabilidades en las abscisas y escala logarítmica en las ordenadas para diferentes tiempos, se obtenía aproximadamente una línea recta (ver figura 15).

El segmento comprendido entre el 10% y el 90% era el más regular y por eso Morril sugirió que la relación entre uno y otro se tomara como índice de dispersión. De esta manera obtenemos la siguiente relación.

$$\text{Índice de Morril} = \frac{\text{Tiempo en que pasa el 90\%}}{\text{Tiempo en que pasa el 10\%}} \quad \text{Ecu. 3.30}$$

Para calcular los valores correspondientes a los tiempos **t90**, **t50** y **t10** se puede utilizar la ecuación siguiente:

$$t = t_a + \frac{(x\% - C t_a)}{\Delta(\Sigma(C - C_o))} * (t_b - t_a) \quad \text{Ecu. 3.30.1}$$

Donde:

**t<sub>a</sub>**=tiempo en donde se da un porcentaje inferior al porcentaje en análisis (10%, 50%, 90%)

$t_b$ =tiempo en donde se da un porcentaje mayor al porcentaje en análisis (10%, 50%, 90%)

$x\%$ =porcentaje en análisis

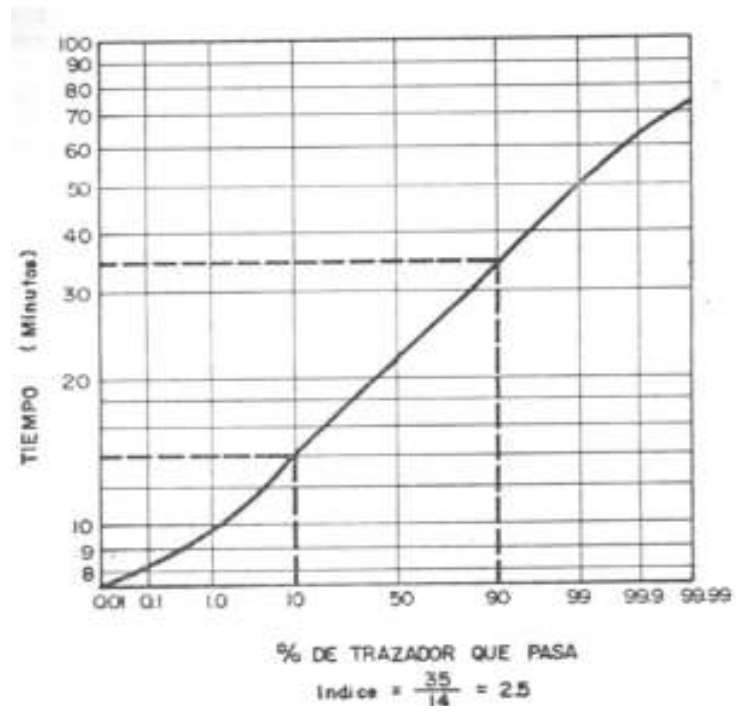
$Ct_a$ =concentración  $\Sigma(C-C_0)$  en el tiempo  $t_a$

$\Delta(\Sigma(C-C_0))$ =diferencia entre las concentraciones correspondientes a los tiempos  $t_a$  y  $t_b$

Si todo el flujo fuera de pistón, la curva de la figura 15 sería una línea horizontal y el índice de Morril sería 1, pues todo el trazador saldría en el tiempo  $t=t_0$  y nada saldría antes. En cambio, a medida que hay más proporción de flujo mezclado, se aumenta el ángulo que la curva hace con la horizontal, pues hay una distribución más amplia del tiempo de retención.

- (i) El estudio de la totalidad de la curva puede suministrar una información más completa que las tendencias centrales. Generalmente, el solo observar la curva de trazadores da una primera indicación del comportamiento hidráulico del reactor que se estudia. El flujo de pistón puro, como se muestra en la figura 14 viene representada por el tiempo que transcurre hasta que aparece la primera huella del trazador. Algunos autores consideran que este se puede tomar en el punto de inflexión I1 cuando la curva cambia de cóncava a convexa. De aquí en adelante el flujo debe considerarse que no es de pistón; entre dicho punto y el punto de inflexión I2 en la rama descendente, el flujo es dual (pistón y no pistón combinados). A partir del segundo punto de inflexión del flujo tiene un carácter predominante mixto.

Figura 15. Curva del Índice de Morril





## 4. APLICACIÓN

En La Planta De Tratamiento De Agua Potable **Lo De Coy** se realizaron los ensayos necesarios para determinar los parámetros teóricos y los parámetros reales de operación, (el ensayo teórico, el ensayo con trazadores o ensayo practico). Estos ensayos fueron realizados de acuerdo a los procedimientos descritos en el capitulo anterior (Teoría de ensayos) y siguiendo la tecnología del **CEPIS, OPS y OMS**.

### 4.1. Ensayo teórico

#### 4.1.1. Selección de caudales

La planta de “Lo de Coy” fue diseñada para un caudal medio  $Q=960\text{l/s}$  y un caudal máximo  $Q=1248\text{l/s}$  además se obtuvo información del caudal máximo histórico  $Q_{mxh}=1640\text{l/s}$ , por lo que este rango de caudales se considero para la realización del ensayo teórico y los ensayos de los parámetros reales de operación (prueba de trazadores). En la Tabla VI, se presentan algunos caudales de importancia para la realización del análisis presente.

**Tabla VI. Capacidad de producción de la planta de tratamiento de agua potable Lo De Coy**

CONDICIÓN	CAUDAL $\text{m}^3/\text{día}$	CAUDAL $\text{m}^3/\text{s}$
Caudal teórico (Diseño)	82,944.00	0.960
Caudal máximo (Diseño)	107,827.20	1.248
Caudal máximo (Hidráulico)	141,696.00	1.640

Fuente: Rivera Juárez Alfredo Evaluación Del Proceso De Filtración De La Planta De Tratamiento De Agua Potable Lo De Coy.

En la Tabla VII se presentan los parámetros de diseño para las unidades de floculación.

**Tabla VII. Datos de diseño de un floculador de la planta de tratamiento de agua potable “Lo De Coy**

Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Parámetro	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tiempo Total (min)	Observaciones
<b>0.32</b>	GRADIENTE (s <sup>-1</sup> )	48	31	23	16	----	1/3 Qmedio 1era. Etapa (3 floculadores en servicio)
	TIEMPO (min)	6.3	6.3	6.3	6.3	25.2	
<b>0.416</b>	GRADIENTE (s <sup>-1</sup> )	72	46	35	25	----	1/3 Qmáximo 1era. Etapa (3 floculadores en servicio)
	TIEMPO (min)	4.8	4.9	4.8	4.9	19.4	
<b>0.48</b>	GRADIENTE (s <sup>-1</sup> )	89	56	44	31	----	1/2 Qmedio 1era. Etapa (2 floculadores en servicio)
	TIEMPO (min)	4.2	4.2	4.2	4.2	16.8	
<b>0.502</b>	GRADIENTE (s <sup>-1</sup> )	95	60	47	33	----	Qmáximo 2da. Etapa (6 floculadores en servicio)
	TIEMPO (min)	4	4	4	4.1	16.1	
<b>0.624</b>	GRADIENTE (s <sup>-1</sup> )	132	84	65	45	----	Qmáximo 1era. Etapa (2 floculadores en servicios)
	TIEMPO (min)	3.2	3.3	3.2	3.3	13	

Fuente: Manual De Operaciones De La Planta De Tratamiento Lo De Coy.

De acuerdo con esto la planta opera con varios caudales, que se puedan dar a lo largo del año, la selección de los caudales que sirvieron para la realización de los ensayos se basó en la que se enuncia en la Tabla VII en el que se presentan los datos de diseño de un floculador para la planta Lo De Coy, para el caudal máximo histórico  $Q_{mxh}=1640\text{l/s}$  se uso un  $Q=546.7\text{l/s}$  por cada unidad de floculación.

#### **4.1.2. Resultados obtenidos**

##### **4.1.2.1. Determinación de los parámetros hidráulicos del proceso de floculación**

La determinación de los parámetros hidráulicos del proceso de floculación se realizó mediante diferentes hojas de cálculo. En las Tablas VIII, IX y XII al XV se presenta un ejemplo práctico en donde se calcularon los parámetros hidráulicos para un caudal  $Q=320\text{ l/s}$ . En las Tablas X y XI se presentan las cotas de los tirantes de agua de los caudales seleccionados.

Para el cálculo de los parámetros teóricos se tomaron varios criterios que se mencionan a continuación:

- Con los resultados de las mediciones realizadas a los floculadores se determinó que estos son iguales en promedio, debido a esto se realizaron los ensayos teórico y práctico en un solo floculador, para mayor facilidad de desarrollo de los ensayos se tomó el floculador 1. (**Ver figura 16. Floculadores existentes**).

- La longitud de cada canal es de 4.50 m, la longitud en el cambio de tramo es de 4.65, por lo que se hace la observación, ya que en la hoja de cálculo solo se toman en cuenta en las ecuaciones que utilizan estos valores.
- Para el cálculo de los gradiente de velocidad **G** se utilizaron los valores siguientes:  $T=20^{\circ}\text{C}$ ,  $\mu=10.288 \cdot 10^{-5} \text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ,  $\gamma=998.21 \text{kgs}/\text{m}^3$ .

En la Tabla IX se presenta el cálculo del volumen correspondiente a la franja que existe entre las pantallas, haciendo pasar un caudal  $Q=320 \text{l/s}$  por los floculadores.

**Tabla IX. Determinación del volumen de la franja entre las pantallas de los floculadores, para un  $Q=320 \text{l/s}$**

Tramo	Tramo Parcial	Ancho De Pantalla 1	Ancho De Pantalla 2	Ancho Promedio	Longitud	Altura 1	Altura 2	Altura Promedio	Volumen Entre Ancho De Pantallas
TRAMO 1	B2-B3	0.105	0.090	0.098	1.250	1.840	1.805	1.823	0.222
	C1-C2	0.090	0.100	0.095	1.250	1.805	1.800	1.803	0.214
	D2-D3	0.100	0.080	0.090	1.250	1.800	1.790	1.795	0.202
	E1-E2	0.080	0.100	0.090	1.250	1.790	1.790	1.790	0.201
	F2-F3	0.101	0.080	0.091	1.250	1.790	1.795	1.793	0.203
	G1-G2	0.090	0.102	0.096	1.250	1.795	1.800	1.798	0.216
	H2-H3	0.109	0.090	0.100	1.250	1.800	1.785	1.793	0.223
	I1-I2	0.070	0.100	0.085	1.250	1.785	1.783	1.784	0.190
	J2-J3	0.102	0.080	0.091	1.250	1.783	1.783	1.783	0.203
	K1-K2	0.070	0.098	0.084	1.250	1.783	1.783	1.783	0.187
	L2-L3	0.103	0.080	0.092	1.250	1.783	1.783	1.783	0.204
	M1-M2	0.070	0.105	0.088	1.250	1.783	1.783	1.783	0.195
	N2-N3	0.080	0.103	0.092	1.250	1.783	1.778	1.780	0.204
	O1-O2	0.080	0.103	0.092	1.250	1.778	1.783	1.780	0.204
	P2-P3	0.110	0.090	0.100	1.250	1.783	1.783	1.783	0.223
Q1-Q2	0.070	0.100	0.085	1.250	1.783	1.783	1.783	0.189	
volumen total TI									3.279



Continuación

TRAMO 2	B2.1-B2.2	0.090	0.102	0.096	1.500	1.763	1.768	1.765	0.254
	C2.2-C2.3	0.107	0.110	0.109	1.500	1.768	1.773	1.770	0.288
	D2.1-D2.2	0.080	0.106	0.093	1.500	1.773	1.770	1.771	0.247
	E2.2-E2.3	0.101	0.080	0.091	1.500	1.770	1.773	1.771	0.240
	F2.1-F2.2	0.080	0.104	0.092	1.500	1.773	1.778	1.775	0.245
	G2.2-G2.3	0.110	0.100	0.105	1.500	1.778	1.768	1.773	0.279
	H2.1-H2.2	0.100	0.103	0.102	1.500	1.768	1.768	1.768	0.269
	I2.2-I2.3	0.109	0.090	0.100	1.500	1.768	1.770	1.769	0.264
	J2.1-J2.2	0.080	0.102	0.091	1.500	1.770	1.778	1.774	0.242
	K2.2-K2.3	0.102	0.080	0.091	1.500	1.778	1.778	1.778	0.243
	L2.1-L2.2	0.080	0.101	0.091	1.500	1.778	1.783	1.780	0.242
	M2.2-M2.3	0.103	0.070	0.087	1.500	1.783	1.788	1.785	0.232
volumen total T2								3.045	

**Tabla IX. Determinación del volumen de la franja entre las pantallas de los floculadores, para un Q=320l/s**

Tramo	Tramo Parcial	Ancho De Pantalla 1	Ancho De Pantalla 2	Ancho Promedio	Longitud	Altura 1	Altura 2	Altura Promedio	Volumen Entre Ancho De Pantallas
TRAMO 3	A3.2-A3.3	0.106	0.100	0.103	1.500	1.765	1.765	1.765	0.273
	B3.1-B3.2	0.102	0.100	0.101	1.500	1.765	1.760	1.763	0.267
	C3.2-C3.3	0.104	0.100	0.102	1.500	1.760	1.758	1.759	0.269
	D3.1-D3.2	0.104	0.100	0.102	1.500	1.758	1.768	1.763	0.270
	E3.2-E3.3	0.105	0.100	0.103	1.500	1.768	1.753	1.760	0.271
	F3.1-F3.2	0.108	0.100	0.104	1.500	1.753	1.760	1.756	0.274
	G3.2-G3.3	0.103	0.100	0.102	1.500	1.760	1.733	1.746	0.266
	H3.1-H3.2	0.100	0.100	0.100	1.500	1.733	1.738	1.735	0.260
	I3.2-I3.3	0.104	0.100	0.102	1.500	1.738	1.740	1.739	0.266
	J3.1-J3.2	0.100	0.100	0.100	1.500	1.740	1.738	1.739	0.261
volumen total T3								2.676	
TRAMO 4	B4.1-B4.2	0.101	0.100	0.101	1.700	1.728	1.733	1.730	0.296
	C4.2-C4.3	0.103	0.100	0.102	1.700	1.733	1.733	1.733	0.299
	D4.1-D4.2	0.107	0.100	0.104	1.700	1.733	1.738	1.735	0.305
	E4.2-E4.3	0.103	0.100	0.102	1.700	1.738	1.730	1.734	0.299
	F4.1-F4.2	0.102	0.100	0.101	1.700	1.730	1.738	1.734	0.298
	G4.2-G4.3	0.106	0.100	0.103	1.700	1.738	1.738	1.738	0.304
	H4.1-H4.2	0.106	0.100	0.103	1.700	1.738	1.743	1.740	0.305
	I4.2-I4.3	0.108	0.100	0.104	1.700	1.743	1.738	1.740	0.308
volumen total T4								2.413	

En la Tabla X, se presentan las cotas del tirante de agua de los floculadores para los distintos caudales en análisis.

**Tabla X. Cotas del tirante de agua de los floculadores para los distintos caudales en análisis**

Caudal	Q=320/s			Q=416/s			Q=480/s			Q=546.7/s		
	Tramo	Tramo Parcial	Altura Promedio	Altura 1	Altura 2	Altura Promedio	Altura 1	Altura 2	Altura Promedio	Altura 1	Altura 2	Altura Promedio
TRAMO 1	B2-B3	1.84	1.805	1.823	1.96	1.935	1.948	2.05	2.015	2.033	2.13	2.123
	C1-C2	1.805	1.8	1.803	1.935	1.925	1.93	2.015	2.005	2.01	2.115	2.11
	D2-D3	1.8	1.79	1.795	1.925	1.925	1.925	2.005	1.995	2	2.105	2.1
	E1-E2	1.79	1.79	1.79	1.925	1.93	1.928	1.995	1.995	1.995	2.095	2.09
	F2-F3	1.79	1.795	1.793	1.93	1.92	1.925	1.995	1.975	1.985	2.085	2.08
	G1-G2	1.795	1.8	1.798	1.92	1.92	1.92	1.975	1.985	1.98	2.075	2.075
	H2-H3	1.8	1.785	1.793	1.92	1.915	1.918	1.985	1.965	1.975	2.075	2.065
	I1-I2	1.785	1.783	1.784	1.915	1.895	1.905	1.965	1.955	1.96	2.065	2.038
	J2-J3	1.783	1.783	1.783	1.895	1.895	1.895	1.955	1.955	1.955	2.038	2.045
	K1-K2	1.783	1.783	1.783	1.895	1.885	1.89	1.955	1.948	1.951	2.045	2.035
	L2-L3	1.783	1.783	1.783	1.885	1.895	1.89	1.948	1.948	1.948	2.035	2.035
	M1-M2	1.783	1.783	1.783	1.895	1.878	1.886	1.948	1.938	1.943	2.035	2.015
	N2-N3	1.783	1.778	1.78	1.878	1.883	1.88	1.938	1.928	1.933	2.015	2.015
	O1-O2	1.778	1.783	1.78	1.883	1.875	1.879	1.928	1.923	1.925	2.015	1.998
	P2-P3	1.783	1.783	1.783	1.875	1.884	1.879	1.923	1.915	1.919	1.998	2.015
Q1-Q2	1.783	1.783	1.783	1.884	1.865	1.874	1.915	1.918	1.916	2.015	1.995	
TRAMO 2	B2.1-B2.2	1.763	1.768	1.765	1.825	1.828	1.826	1.848	1.853	1.85	1.905	1.91
	C2.2-C2.3	1.768	1.773	1.77	1.828	1.838	1.833	1.853	1.863	1.858	1.915	1.92
	D2.1-D2.2	1.773	1.77	1.771	1.838	1.843	1.84	1.863	1.868	1.865	1.925	1.93
	E2.2-E2.3	1.77	1.773	1.771	1.843	1.843	1.843	1.868	1.878	1.873	1.935	1.94
	F2.1-F2.2	1.773	1.778	1.775	1.843	1.848	1.845	1.878	1.873	1.875	1.945	1.945
	G2.2-G2.3	1.778	1.768	1.773	1.848	1.853	1.85	1.873	1.873	1.873	1.945	1.951
	H2.1-H2.2	1.768	1.768	1.768	1.853	1.848	1.85	1.873	1.888	1.88	1.958	1.956
	I2.2-I2.3	1.768	1.77	1.769	1.848	1.855	1.851	1.888	1.893	1.89	1.955	1.96
	J2.1-J2.2	1.77	1.778	1.774	1.855	1.858	1.856	1.893	1.903	1.898	1.965	1.97
	K2.2-K2.3	1.778	1.778	1.778	1.858	1.863	1.86	1.903	1.893	1.898	1.975	1.975
	L2.1-L2.2	1.778	1.783	1.78	1.863	1.868	1.865	1.893	1.908	1.9	1.975	1.98
	M2.2-M2.3	1.783	1.788	1.785	1.868	1.875	1.871	1.908	1.918	1.913	1.985	1.985

**Tabla XI. Cotas del tirante de agua de los floculadores para los distintos caudales en análisis**

Caudal	Q=320l/s			Q=416l/s			Q=480l/s			Q=546.7l/s		
	Tramo	Tramo Parcial	Altura Promedio	Altura 1	Altura 2	Altura Promedio	Altura 1	Altura 2	Altura Promedio	Altura 1	Altura 2	Altura Promedio
TRAMO 3	A3.2-A3.3	1.765	1.765	1.828	1.828	1.828	1.843	1.848	1.845	1.889	1.903	1.896
	B3.1-B3.2	1.765	1.763	1.828	1.818	1.823	1.848	1.833	1.84	1.903	1.889	1.896
	C3.2-C3.3	1.76	1.759	1.818	1.813	1.815	1.833	1.828	1.83	1.889	1.873	1.881
	D3.1-D3.2	1.758	1.763	1.813	1.818	1.815	1.828	1.833	1.83	1.873	1.885	1.879
	E3.2-E3.3	1.768	1.76	1.818	1.808	1.813	1.833	1.813	1.823	1.885	1.863	1.874
	F3.1-F3.2	1.753	1.756	1.808	1.808	1.808	1.813	1.818	1.815	1.863	1.865	1.864
	G3.2-G3.3	1.76	1.746	1.808	1.783	1.795	1.818	1.788	1.803	1.865	1.828	1.846
	H3.1-H3.2	1.733	1.735	1.783	1.778	1.78	1.788	1.783	1.785	1.828	1.825	1.826
	I3.2-I3.3	1.738	1.739	1.778	1.788	1.783	1.783	1.783	1.785	1.825	1.823	1.824
	J3.1-J3.2	1.74	1.739	1.788	1.773	1.78	1.788	1.778	1.783	1.823	1.808	1.815
TRAMO 4	B4.1-B4.2	1.728	1.73	1.748	1.758	1.753	1.738	1.748	1.743	1.76	1.765	1.763
	C4.2-C4.3	1.733	1.733	1.758	1.758	1.758	1.748	1.748	1.748	1.765	1.768	1.766
	D4.1-D4.2	1.733	1.735	1.758	1.763	1.76	1.748	1.758	1.753	1.768	1.773	1.77
	E4.2-E4.3	1.738	1.734	1.763	1.763	1.763	1.758	1.748	1.753	1.773	1.778	1.775
	F4.1-F4.2	1.73	1.734	1.763	1.778	1.77	1.748	1.773	1.76	1.778	1.798	1.788
	G4.2-G4.3	1.738	1.738	1.778	1.773	1.775	1.773	1.773	1.773	1.798	1.803	1.8
	H4.1-H4.2	1.738	1.74	1.773	1.778	1.775	1.773	1.778	1.775	1.803	1.808	1.805
	I4.2-I4.3	1.743	1.74	1.778	1.773	1.775	1.778	1.773	1.775	1.808	1.808	1.808

**Tabla XII. Determinación de los parámetros hidráulicos teóricos del proceso de floculación (hoja de cálculo)**

Tramo	Cambio de dirección	Tramo de canal	Cota de fondo	Nivel de agua	Profundidad	Ancho (m)		Radio hidráulico RH (m)	Velocidad (m/s)		Pérdida de carga(m)		Volumen (m³)
						Pantalla	Canal		Pantalla	Canal	Pantalla	Canal	
TRAMO 1	A1"		1676.2	1678.09	1.89	0			0		0		
		A1"-B3			<b>1.865</b>	0.85	0.346	0.199		0.0001		7.13	
	B3		1676.19	1678.03	1.84	1.25	0.329	0.139	0.003				
		B3-C1			<b>1.822</b>	0.803		0.217		0.0002		6.58	
	C1		1676.201	1678.01	1.805	1.25	0.335	0.142	0.004				
		C1-D3			<b>1.803</b>	0.822		0.216		0.0002		6.67	
	D3		1676.194	1677.99	1.8	1.25	0.334	0.142	0.004				
		D3-E1			<b>1.795</b>	0.82		0.217		0.0002		6.63	
	E1		1676.19	1677.98	1.79	1.25	0.337	0.143	0.004				
		E1-F3			<b>1.79</b>	0.832		0.215		0.0001		6.7	
	F3		1676.19	1677.98	1.79	1.25	0.331	0.143	0.004				
		F3-G1			<b>1.793</b>	0.813		0.22		0.0002		6.56	
	G1		1676.184	1677.98	1.795	1.25	0.338	0.143	0.004				
		G1-H3			<b>1.798</b>	0.831		0.214		0.0001		6.72	
	H3		1676.171	1677.97	1.8	1.25	0.32	0.142	0.004				
		H3-I1			<b>1.793</b>	0.781		0.228		0.0002		6.3	
	I1		1676.171	1677.96	1.785	1.25	0.349	0.143	0.004				
		I1-J3			<b>1.784</b>	0.868		0.207		0.0001		6.97	
	J3		1676.183	1677.97	1.783	1.25	0.333	0.144	0.004				
		J3-K1			<b>1.783</b>	0.819		0.219		0.0002		6.57	
K1		1676.174	1677.96	1.783	1.25	0.332	0.144	0.004					
	K1-L3			<b>1.783</b>	0.817		0.22		0.0002		6.55		
L3		1676.167	1677.95	1.783	1.25	0.34	0.144	0.004					
	L3-M1			<b>1.783</b>	0.841		0.214		0.0001		6.74		
M1		1676.153	1677.94	1.783	1.25	0.335	0.144	0.004					
	M1-N3			<b>1.783</b>	0.826		0.217		0.0002		6.63		
N3		1676.155	1677.94	1.783	1.25	0.337	0.144	0.004					
	N3-O1			<b>1.78</b>	0.831		0.216		0.0002		6.65		
O1		1676.148	1677.93	1.777	1.25	0.331	0.144	0.004					
	O1-P3			<b>1.78</b>	0.813		0.222		0.0002		6.51		
P3		1676.141	1677.92	1.783	1.25	0.332	0.144	0.004					
	P3-Q1			<b>1.783</b>	0.816		0.22		0.0002		6.55		
1		1676.139	1677.92	1.783	1.25	0.437	0.144	0.004					
	Q1-R			<b>1.783</b>	1.145		0.155		0.0001		9.49		

**Tabla XIII. Determinación de los parámetros hidráulicos teóricos del proceso de floculación (hoja de cálculo)**

Tramo	Cambio De Dirección	Tramo De Canal	Cota De Fondo	Nivel De Agua	Profundidad	Ancho (m)		Radio hidráulico Rh (m)	Velocidad (m/s)		Pérdida De Carga(m)		Volumen (m³)
						Pantalla	Canal		Pantalla	Canal	Pantalla	Canal	
TRAMO 2	M2.3		1676.133	1677.916	1.783	1.5		0.441	0.12	0.003			
		M2.3-R			1.783		1.173			0.153		0.0001	9.73
	L2.1		1676.136	1677.914	1.777	1.5		0.425	0.12	0.003			
		L2.1-M2.3			1.78		1.119			0.161		0.0001	8.96
	K2.3		1676.123	1677.901	1.777	1.5		0.429	0.12	0.003			
		K2.3-L2.1			1.777		1.13			0.159		0.0001	9.04
	J2.1		1676.127	1677.897	1.77	1.5		0.425	0.121	0.003			
		J2.1-K2.3			1.774		1.122			0.161		0.0001	8.96
	I2.3		1676.121	1677.889	1.767	1.5		0.427	0.121	0.003			
		I2.3-J2.3			1.769		1.128			0.161		0.0001	8.98
	H2.1		1676.12	1677.888	1.767	1.5		0.42	0.121	0.003			
		H2.1-I2.3			1.767		1.102			0.164		0.0001	8.76
	G2.3		1676.105	1677.883	1.777	1.5		0.432	0.12	0.003			
		G2.3-H2.1			1.772		1.139			0.158		0.0001	9.08
	F2.1		1676.101	1677.874	1.773	1.5		0.419	0.12	0.003			
		F2.1-G2.3			1.775		1.098			0.164		0.0001	8.77
	E2.3		1676.105	1677.875	1.77	1.5		0.431	0.121	0.003			
		E2.3-F2.1			1.771		1.141			0.158		0.0001	9.09
	D2.1		1676.095	1677.868	1.773	1.5		0.424	0.12	0.003			
		D2.1-E2.3			1.771		1.113			0.162		0.0001	8.87
C2.3		1676.096	1677.864	1.767	1.5		0.426	0.121	0.003				
	C2.3-D2.1			1.77		1.123			0.161		0.0001	8.94	
B2.1		1676.098	1677.861	1.763	1.5		0.427	0.121	0.003				
	B2.1-C2.3			1.765		1.127			0.161		0.0001	8.95	
A3"		1676.1	1677.86	1.76	1.5		0.481	0.121	0.003				
	A3"-B2.1			1.761		1.325			0.137		0	10.49	

**Tabla XIV. Determinación de los parámetros hidráulicos teóricos del proceso de floculación (hoja de cálculo)**

Tramo	Cambio De Dirección	Tramo De Canal	Cota De Fondo	Nivel De Agua	Profundidad	Ancho (m)		Radio Hidráulico RH (m)	Velocidad (m/s)		Perdida De Carga(m)		Volumen (m³)
						Pantalla	Canal		Pantalla	Canal	Pantalla	Canal	
<b>TRAMO 3</b>	A3.3		1676.073	1677.838	1.765	1.5	0.479	0.121	0.003	0	10.78		
		A3.3-A3			<b>1.765</b>	1.314		0.138		0.003	0		
	B3.1		1676.073	1677.838	1.765	1.5	0.493	0.121	0.003	0	10.85		
		B3.1-A3.3			<b>1.763</b>	1.368		0.133		0.003	0		
	C3.3		1676.084	1677.844	1.76	1.5	0.484	0.121	0.003	0	10.56		
		C3.3-B3.1			<b>1.759</b>	1.335		0.136		0.003	0		
	D3.1		1676.089	1677.847	1.757	1.5	0.484	0.121	0.003	0	10.59		
		D3.1-C3.3			<b>1.762</b>	1.335		0.136		0.003	0		
	E3.3		1676.078	1677.846	1.767	1.5	0.485	0.121	0.003	0	10.61		
		E3.3-D3.1			<b>1.76</b>	1.34		0.135		0.003	0		
	F3.1		1676.078	1677.831	1.753	1.5	0.487	0.122	0.003	0	10.64		
		F3.1-E3.3			<b>1.756</b>	1.346		0.136		0.003	0		
	G3.3		1676.072	1677.832	1.76	1.5	0.481	0.121	0.003	0	10.44		
		G3.3-F3.1			<b>1.746</b>	1.329		0.137		0.003	0		
	H3.1		1676.086	1677.819	1.733	1.5	0.488	0.123	0.003	0	10.61		
		H3.1-G3.3			<b>1.735</b>	1.359		0.136		0.003	0		
I3.3		1676.086	1677.824	1.737	1.5	0.479	0.123	0.003	0	10.35			
	I3.3-H3.1			<b>1.739</b>	1.323		0.139		0.003	0			
J3.1		1676.072	1677.812	1.74	1.5	0.485	0.123	0.003	0	10.53			
	J3.1-I3.3			<b>1.739</b>	1.346		0.137		0.003	0			
K3.3		1676.076	1677.814	1.737	1.5	0.571	0.123	0.003	0	13.76			
	K3.3-J3.1			<b>1.737</b>	1.703		0.108		0.003	0			

**Tabla XV. Determinación de los parámetros hidráulicos teóricos del proceso de floculación (hoja de cálculo)**

Tramo	Cambio De Dirección	Tramo De Canal	Cota De Fondo	Nivel De Agua	Profundidad	Ancho (m)		Radio Hidráulico Rh (m)	Velocidad (m/s)		Pérdida De Carga(m)		Volumen (m³)
						Pantalla	Canal		Pantalla	Canal	Pantalla	Canal	
TRAMO 4	I4.3		1676.071	1677.81	1.737	1.7		0.571	0.108		0.002		
		I4.3-K3.3			1.737		1.7		0.108			0	13.75
		H4.1	1676.068	1677.81	1.743	1.7		0.574	0.108		0.002		
		H4.1-H4.3			1.74		1.708		0.108			0	13.37
		G4.3	1676.063	1677.8	1.737	1.7		0.573	0.108		0.002		
		G4.3-H4.1			1.74		1.713		0.108			0	13.41
		F4.1	1676.061	1677.8	1.737	1.7		0.569	0.108		0.002		
		F4.1-G4.3			1.737		1.694		0.109			0	13.24
		E4.3	1676.064	1677.79	1.73	1.7		0.563	0.109		0.002		
		E4.3-F4.1			1.734		1.672		0.111			0	13.04
		D4.1	1676.06	1677.8	1.737	1.7		0.575	0.108		0.002		
		D4.1-E4.3			1.734		1.715		0.107			0	13.38
		C4.3	1676.056	1677.79	1.733	1.7		0.566	0.109		0.002		
		C4.3-D4.1			1.735		1.683		0.11			0	13.14
	B4.1	1676.057	1677.79	1.733	1.7		0.579	0.109		0.002			
	B4.1-C4.3			1.733		1.741		0.106			0	13.57	
	A4.1"	1676.057	1677.79	1.73	1.7		0.563	0.109		0.002			
	A4.1"-B4.1			1.731		1.673		0.111			0	13.02	

**Tabla XVI. Resumen de los parámetros hidráulicos teóricos del proceso de floculación para el caudal Q=320l/s**

Tramo	Volumen entre pantallas (m <sup>3</sup> )	Volumen total por tramo (m <sup>3</sup> )	Tiempo de retención por tramo (min)	Perdida de carga por tramo (m)	Gradiente de velocidad por tramo (s <sup>-1</sup> )
1	3.28	119.22	6.21	0.061	39.76
2	3.04	121.67	6.34	0.032	28.47
3	2.68	122.41	6.38	0.027	26.09
4	2.41	122.34	6.37	0.017	20.73

#### 4.1.2.1.1. Volumen de la unidad de floculación

En esta sección se presentan los volúmenes calculados para los caudales seleccionados de este análisis, estos volúmenes se determinaron con las medidas reales de los floculadores las que se obtuvieron mediante métodos topográficos. Las dimensiones de los floculadores se presentan en la **figura 16** y el en las Tablas XII a XV se presentan las dimensiones de los canales.

**Tabla XVII. Volúmenes para los caudales seleccionados**

Caudal (l/s)	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO 4	Volumen m <sup>3</sup>
320.00	119.22	121.67	122.41	122.34	485.64
416.00	126.84	127.17	125.92	124.55	504.48
480.00	130.84	129.30	126.52	124.12	510.78
546.70	136.88	134.07	129.64	125.97	526.56

Los volúmenes presentados en la Tabla XVII son producto de realizar varias hojas de cálculo, correspondientes a los caudales que fueron seleccionados.



#### 4.1.2.1.2. Tiempo teórico de retención

El tiempo teórico de retención esta dado por la relación entre el volumen de la unidad de floculación y el caudal que ingresa a esta. La ecuación 3.6 esta relacionada con los conceptos de continuidad  $t = \frac{V}{Q}$ , de esta manera se puede definir el tiempo de retención teórico para los caudales expuestos en la sección 4.1.1. A continuación se presentan los resultados obtenidos al hacer varias hojas de cálculo con los caudales seleccionados. En la Tabla XVIII se presentan los tiempos de retención teóricos.

**Tabla XVIII. Tiempos de retención teóricos para los caudales seleccionados**

Caudal (l/s)	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO 4	Tiempo (min)
320.00	6.21	6.34	6.38	6.37	25.30
416.00	5.08	5.09	5.04	5.00	20.21
480.00	4.54	4.49	4.39	4.32	17.74
546.70	4.17	4.09	3.95	3.84	16.05

#### 4.1.2.1.3. Gradiente de velocidad

La determinación del gradiente de velocidad se obtuvo utilizando la ecuación 3.7 y siguiendo los criterios de la sección 3.1.3. se hicieron varias hojas de cálculo para los caudales seleccionados. Los resultados de las hojas de cálculo se resumen en las Tablas XVIII y XIX.

**Tabla XIX. Gradiente de velocidad teórico  $G$  ( $s^{-1}$ ) por tramo para los caudales seleccionados**

<b>Caudal (l/s)</b>	<b>TRAMO 1</b>	<b>TRAMO 2</b>	<b>TRAMO 3</b>	<b>TRAMO 4</b>
320.00	39.72	28.47	26.09	20.73
416.00	53.64	39.59	37.07	29.91
480.00	63.44	47.87	45.60	37.25
546.70	72.07	55.07	53.42	44.31

## **4.2. Ensayo con trazadores**

### **4.2.1. Variación de caudales**

Los caudales que se utilizaran en esta parte del análisis son los mismos que fueron seleccionados en la sección 4.11. (Selección de caudales), esto caudales son: 320l/s, 416l/s, 460l/s, 546.7l/s.

### **4.2.2. Datos obtenidos**

Como se indico anteriormente se analizo un rango de caudales con los que ha operado la planta de tratamiento de agua potable Lo De Coy, a continuación se presentan los datos obtenidos de los ensayos con trazadores utilizando estos caudales (ver selección de caudales 4.1.1.).

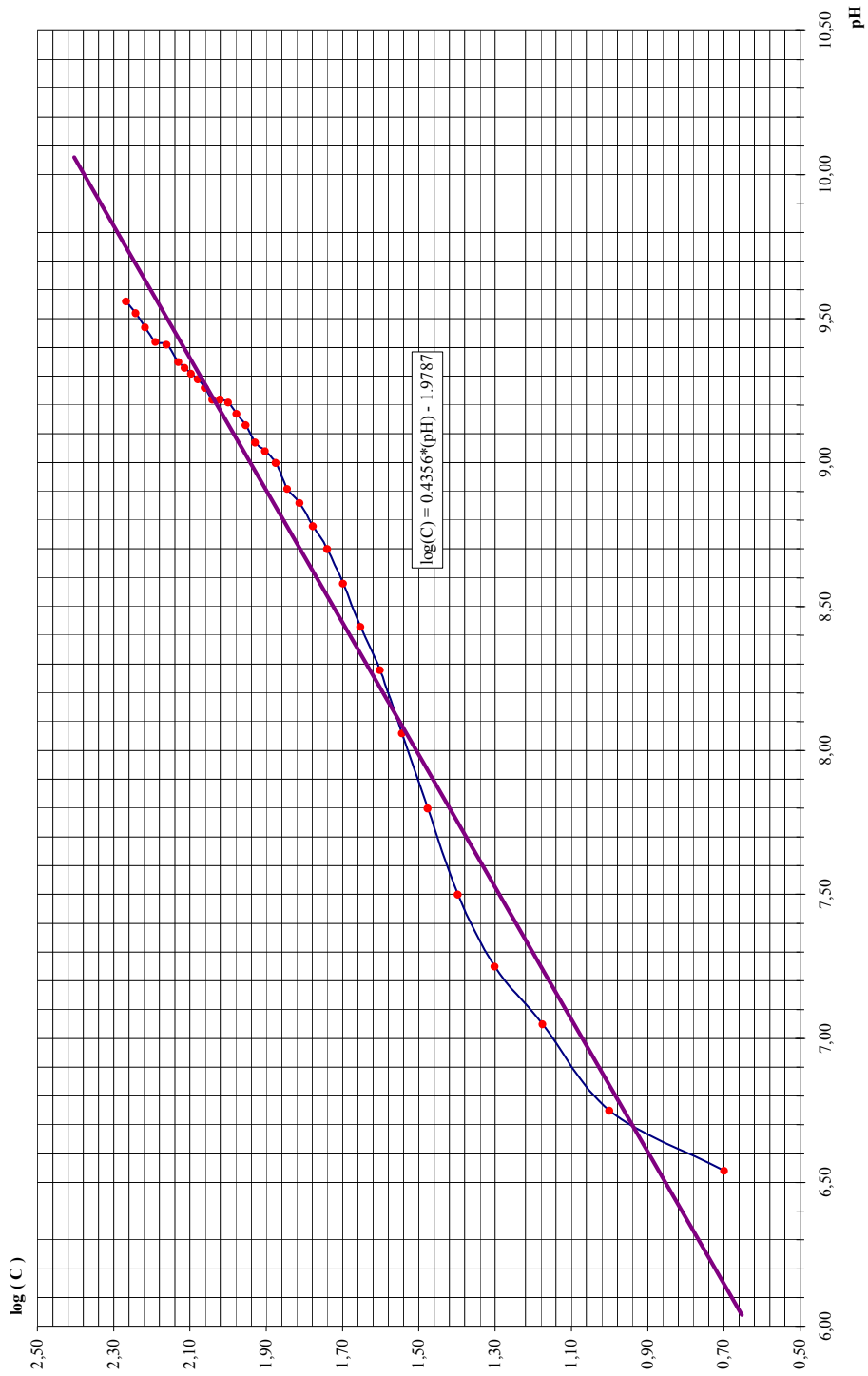
#### **4.2.2.1. Prueba de trazadores para el ensayo del caudal medio $Q = 320$ l/s**

Según lo descrito en la sección 3.2.3.2.2, (Procedimiento para realizar el ensayo de trazadores), se debe elaborar la curva de calibración pH vrs. Concentración (mg/l). En la Tabla XX se muestran los resultados, con los cuales se elabora la curva de la figura 17.

**Tabla XX. Curva de calibración número 1**

Muestra	pH	C (mg/L)	Log C	$\log(Y)=a*X+b$	C (mg/l) Ecuación
1	6.480	0		0.844	6.982
2	6.540	5	0.699	0.870	7.415
3	6.750	10	1.000	0.962	9.154
4	7.050	15	1.176	1.092	12.367
5	7.250	20	1.301	1.179	15.115
6	7.500	25	1.398	1.288	19.422
7	7.800	30	1.477	1.419	26.241
8	8.060	35	1.544	1.532	34.059
9	8.280	40	1.602	1.628	42.469
10	8.430	45	1.653	1.693	49.364
11	8.580	50	1.699	1.759	57.378
12	8.700	55	1.740	1.811	64.717
13	8.780	60	1.778	1.846	70.124
14	8.860	65	1.813	1.881	75.983
15	8.910	70	1.845	1.902	79.891
16	9.000	75	1.875	1.942	87.438
17	9.040	80	1.903	1.959	91.017
18	9.070	85	1.929	1.972	93.798
19	9.130	90	1.954	1.998	99.616
20	9.170	95	1.978	2.016	103.694
21	9.210	100	2.000	2.033	107.938
22	9.220	105	2.021	2.038	109.026
23	9.220	110	2.041	2.038	109.026
24	9.260	115	2.061	2.055	113.490
25	9.290	120	2.079	2.068	116.956
26	9.310	125	2.097	2.077	119.326
27	9.330	130	2.114	2.085	121.744
28	9.350	135	2.130	2.094	124.211
29	9.410	145	2.161	2.120	131.916
30	9.420	155	2.190	2.125	133.245
31	9.470	165	2.217	2.146	140.098
32	9.520	175	2.243	2.168	147.303
33	9.560	185	2.267	2.186	153.333

Figura 17. Curva de calibración número 1  $\log(C) = a*(pH)+b$



#### 4.2.2.1.1. Cantidad de trazador

Según la curva de calibración (figura 17) para hacer variar el **pH** lo suficiente que sea perceptible a los aparatos que se utilizaron se necesita una concentración de 140mg/l de cal hidratada  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

$$P = \frac{V * C_o}{I * 10^3}$$

Donde:

**P** = Peso de trazador a añadir al reactor (kg)

**V** = Volumen del reactor ( $\text{m}^3$ )

**C<sub>o</sub>** = Concentración (mg/l)

**I** = Grado de pureza del trazador (fracción de unidad)

**Cálculo:**

**P** = ? (kg)

**V** = 485.64 ( $\text{m}^3$ )

**C<sub>o</sub>** = 140 (mg/l)

**I** = Grado de pureza del trazador (fracción de unidad).

$$P = \frac{485.64 * 140}{1000 * 1} = 67.99 \cong 68\text{kg} \Rightarrow 68 * 2.2054 = 149.9672 \cong 150\text{lb}$$

Se aplicaron 150lb de cal hidratada y se tomaron muestras para determinar el pH como se indica en la Tabla XXI. Ya que el peso de trazador a añadir al reactor solo sirve para hacer una variación notable en el efluente se consideró aplicar la misma cantidad de cal hidratada para los subsiguientes caudales.

**Tabla XXI. Resultados obtenidos de la prueba con trazadores para un caudal de Q=320l/s**

Muestra	tiempo (min)	t/to	pH	C (mg/L)	C-Co	□(C-Co)	F(t)	100-F(t)
1	0.00	0.00	6.48	6.98	0.00	0.00	0.00	100.00
2	2.00	0.08	6.48	6.98	0.00	0.00	0.00	100.00
3	4.00	0.16	6.48	6.98	0.00	0.00	0.00	100.00
4	6.00	0.24	6.48	6.98	0.00	0.00	0.00	100.00
5	8.00	0.32	6.48	6.98	0.00	0.00	0.00	100.00
6	10.00	0.40	6.48	6.98	0.00	0.00	0.00	100.00
7	12.00	0.48	6.50	7.12	0.14	0.14	0.00	100.00
8	14.00	0.56	6.58	7.72	0.74	0.88	0.02	99.98
9	16.00	0.64	6.66	8.36	1.38	2.26	0.04	99.96
10	18.00	0.72	6.90	10.64	3.66	5.92	0.11	99.89
11	18.50	0.74	7.00	11.76	4.78	10.70	0.20	99.80
12	20.00	0.80	7.13	13.40	6.42	17.12	0.32	99.68
13	21.00	0.84	7.40	17.57	10.59	27.70	0.52	99.48
14	22.00	0.88	7.88	28.43	21.45	49.16	0.92	99.08
15	23.00	0.92	9.25	112.36	105.37	154.53	2.88	97.12
16	24.00	0.96	10.04	248.16	241.17	395.70	7.39	92.61
17	25.00	1.00	10.93	605.91	598.93	994.63	18.57	81.43
18	26.00	1.04	10.99	643.49	636.51	1631.14	30.45	69.55
19	26.50	1.06	11.09	711.38	704.40	2335.55	43.60	56.40
20	27.00	1.08	11.05	683.41	676.43	3011.97	56.23	43.77
21	27.50	1.10	10.84	553.61	546.63	3558.60	66.44	33.56
22	28.00	1.12	10.40	356.07	349.09	3907.69	72.95	27.05
23	28.50	1.14	10.34	335.28	328.30	4235.99	79.08	20.92
24	29.00	1.16	9.93	222.23	215.25	4451.24	83.10	16.90
25	29.50	1.18	10.02	243.23	236.25	4687.48	87.51	12.49
26	30.00	1.20	9.62	162.84	155.86	4843.34	90.42	9.58
27	30.50	1.22	9.40	130.60	123.62	4966.96	92.73	7.27
28	31.00	1.24	9.19	105.79	98.81	5065.77	94.57	5.43
29	31.50	1.26	8.98	85.70	78.72	5144.49	96.04	3.96
30	32.00	1.28	8.76	68.73	61.75	5206.24	97.20	2.80
31	32.50	1.30	8.36	46.02	39.03	5245.28	97.92	2.08
32	33.00	1.32	7.98	31.43	24.45	5269.73	98.38	1.62

### Continuación

Muestra	tiempo (min)	t/to	pH	C (mg/L)	C-Co	□(C-Co)	F(t)	100-F(t)
33	33.50	1.34	7.60	21.47	14.49	5284.22	98.65	1.35
34	34.00	1.36	7.66	22.80	15.82	5300.04	98.95	1.05
35	34.50	1.38	7.40	17.57	10.59	5310.63	99.14	0.86
36	35.00	1.40	7.25	15.11	8.13	5318.76	99.30	0.70
37	35.50	1.42	7.37	17.05	10.07	5328.83	99.48	0.52
38	36.00	1.44	7.25	15.11	8.13	5336.96	99.64	0.36
39	38.00	1.52	7.20	14.38	7.39	5344.35	99.77	0.23
40	40.00	1.60	7.10	13.00	6.02	5350.37	99.89	0.11
41	42.00	1.68	7.03	12.12	5.14	5355.51	99.98	0.02
42	44.00	1.77	6.61	7.95	0.97	5356.49	100.00	0.00
43	46.00	1.85	6.48	6.98	0.00	5356.49	100.00	0.00
44	48.00	1.93	6.48	6.98	0.00	5356.49	100.00	0.00
45	50.00	2.01	6.48	6.98	0.00	5356.49	100.00	0.00

En el cuadro anterior se presentaron los datos que se obtuvieron en la prueba de trazadores para  $Q=320\text{l/s}$ . En las Tablas XXIII, XXIV y XXV se presentan los resultados de las pruebas realizadas con trazadores.

#### 4.2.2.2. Prueba de trazadores para el ensayo del caudal $Q=416\text{ l/s}$

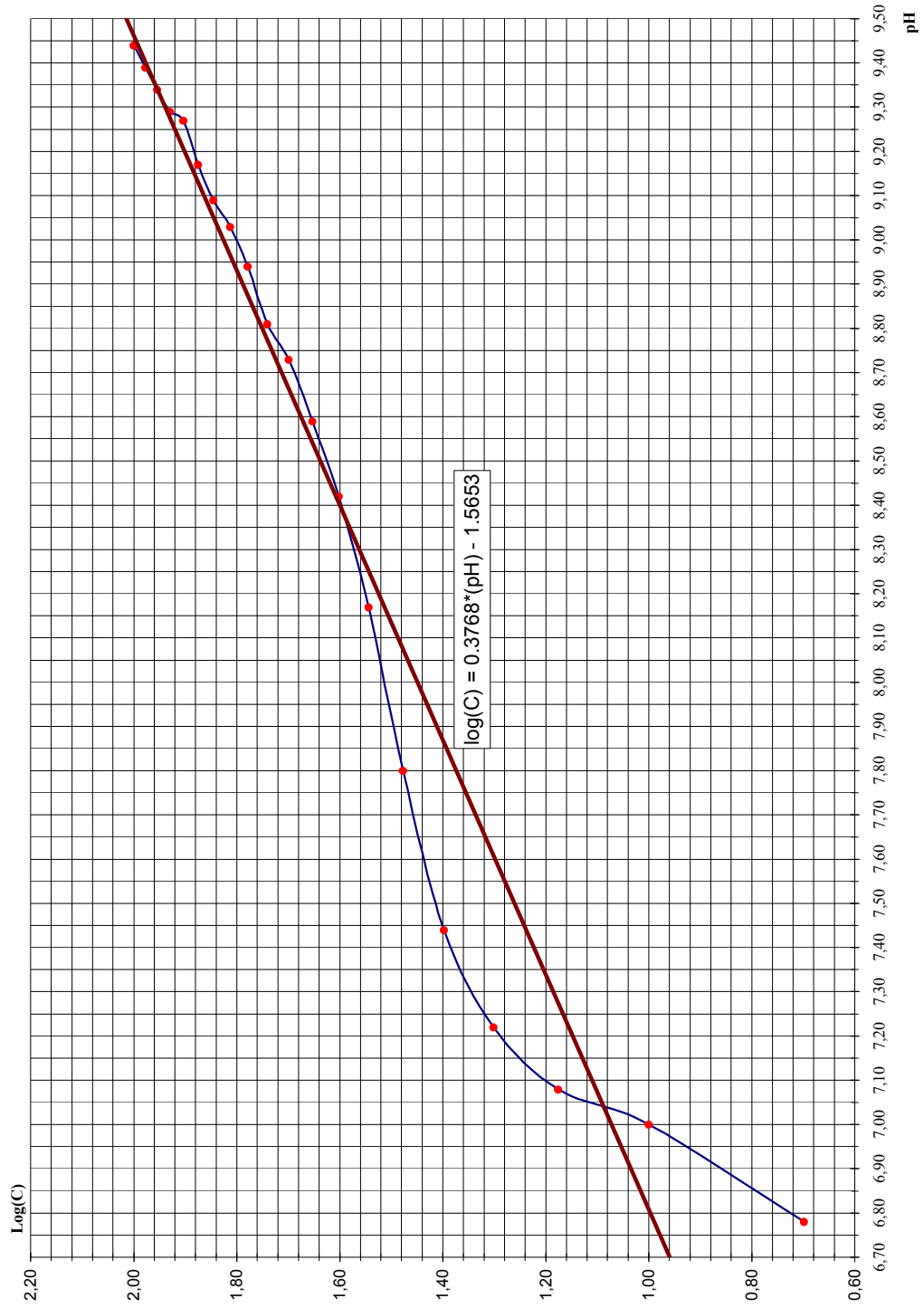
Según lo descrito en la sección 3.2.3.2.2, (Procedimiento para realizar el ensayo de trazadores), se debe elaborar la curva de calibración **pH** vs. Concentración (mg/l). En la Tabla XXII, se muestran los resultados, con los cuales se elabora la curva de la figura 18.

**Tabla XXII. Curva de calibración número 2**

<b>Muestra</b>	<b>pH</b>	<b>C (mg/L)</b>	<b>Log C</b>	<b>log(Y)=a*X+b</b>	<b>C (mg/l) Ecuación</b>
1	6.690	0	---	0.955	9.026
2	6.780	5	0.699	0.989	9.759
3	7.000	10	1.000	1.072	11.811
4	7.080	15	1.176	1.102	12.660
5	7.220	20	1.301	1.155	14.295
6	7.440	25	1.398	1.238	17.302
7	7.800	30	1.477	1.374	23.645
8	8.170	35	1.544	1.513	32.595
9	8.420	40	1.602	1.607	40.491
10	8.590	45	1.653	1.671	46.926
11	8.730	50	1.699	1.724	52.986
12	8.810	55	1.740	1.754	56.795
13	8.940	60	1.778	1.803	63.576
14	9.030	65	1.813	1.837	68.739
15	9.090	70	1.845	1.860	72.412
16	9.170	75	1.875	1.890	77.617
17	9.270	80	1.903	1.928	84.652
18	9.290	85	1.929	1.935	86.133
19	9.340	90	1.954	1.954	89.952
20	9.390	95	1.978	1.973	93.940
21	9.440	100	2.000	1.992	98.105



Figura 18. Curva de calibración número 2  $\log(C) = a*(pH)+b$



**Tabla XXIII. Resultados obtenidos de la prueba con trazadores para un caudal de Q=416l/s**

Muestra	tiempo (min)	t/to	pH	C (mg/L)	C-Co	□(C-Co)	F(t)	100-F(t)
1	0.00	0.00	6.77	9.67	0.00	0.00	0.00	100.00
2	2.00	0.10	6.77	9.67	0.00	0.01	0.00	100.00
3	4.00	0.20	6.77	9.67	0.00	0.01	0.00	100.00
4	6.00	0.30	6.81	10.02	0.35	0.36	0.03	99.97
5	8.00	0.40	6.79	9.84	0.17	0.53	0.05	99.95
6	10.00	0.49	6.78	9.76	0.09	0.62	0.06	99.94
7	12.00	0.59	6.79	9.84	0.17	0.80	0.07	99.93
8	14.00	0.69	6.81	10.02	0.35	1.14	0.10	99.90
9	16.00	0.79	6.86	10.46	0.79	1.93	0.18	99.82
10	18.00	0.89	9.03	68.74	59.07	61.00	5.57	94.43
11	20.00	0.99	10.70	292.73	283.06	344.06	31.43	68.57
12	22.00	1.09	11.10	414.17	404.50	748.56	68.38	31.62
13	24.00	1.19	10.47	239.77	230.10	978.66	89.40	10.60
14	26.00	1.29	9.45	98.96	89.29	1067.95	97.55	2.45
15	28.00	1.39	8.02	28.62	18.95	1086.90	99.29	0.71
16	30.00	1.48	7.08	12.66	2.99	1089.89	99.56	0.44
17	32.00	1.58	6.95	11.31	1.64	1091.53	99.71	0.29
18	34.00	1.68	6.88	10.64	0.97	1092.50	99.80	0.20
19	36.00	1.78	6.86	10.46	0.79	1093.29	99.87	0.13
20	38.00	1.88	6.85	10.37	0.70	1093.99	99.93	0.07
21	40.00	1.98	6.84	10.28	0.61	1094.60	99.99	0.01
22	42.00	2.08	6.78	9.76	0.09	1094.69	100.00	0.00
23	44.00	2.18	6.77	9.67	0.00	1094.70	100.00	0.00
24	46.00	2.28	6.77	9.67	0.00	1094.70	100.00	0.00
25	48.00	2.37	6.77	9.67	0.00	1094.71	100.00	0.00
26	50.00	2.47	6.77	9.67	0.00	1094.71	100.00	0.00
27	52.00	2.57	6.77	9.67	0.00	1094.71	100.00	0.00
28	54.00	2.67	6.77	9.67	0.00	1094.72	100.00	0.00
29	56.00	2.77	6.77	9.67	0.00	1094.72	100.00	0.00

#### 4.2.2.3. Prueba de trazadores en el caso de un caudal Q=480l/s

Para la realización de este ensayo, se ha seguido siguiendo el procedimiento descrito anteriormente, la curva de calibración para la determinación de la concentración en función del parámetro *pH* es la misma, del ensayo anterior, ya que este ensayo fue realizado el mismo día, y por ello con el mismo valor de *pH<sub>i</sub>*, el cual es fundamental para el cálculo de la curva de calibración. La curva de calibración se puede ver en la figura 18.

En la Tabla XXIV, se presentan los datos obtenidos de la prueba de trazadores con el caudal de Q = 480 l/s.

**Tabla XXIV. Resultados obtenidos de la prueba con trazadores para un caudal de Q=480l/s**

Muestra	tiempo (min)	t/to	pH	C (mg/L)	C-Co	Σ( C-Co)	F(t)	100-F(t)
1	0.00	0.00	6.95	11.31	0.00	0.00	0.00	100.00
2	1.00	0.06	6.95	11.31	0.00	0.00	0.00	100.00
3	2.00	0.11	6.95	11.31	0.00	0.00	0.00	100.00
4	3.00	0.17	7.04	12.23	0.92	0.92	0.06	99.94
5	4.00	0.23	7.00	11.81	0.50	1.42	0.09	99.91
6	5.00	0.28	7.00	11.81	0.50	1.92	0.13	99.87
7	6.00	0.34	7.00	11.81	0.50	2.42	0.16	99.84
8	7.00	0.39	7.02	12.02	0.71	3.13	0.21	99.79
9	8.00	0.45	7.03	12.12	0.81	3.94	0.26	99.74
10	9.00	0.51	7.04	12.23	0.92	4.86	0.32	99.68
11	10.00	0.56	7.05	12.34	1.03	5.89	0.39	99.61
12	11.00	0.62	7.06	12.44	1.13	7.02	0.46	99.54
13	12.00	0.68	7.07	12.55	1.24	8.26	0.54	99.46
14	13.00	0.73	7.09	12.77	1.46	9.72	0.64	99.36
15	14.00	0.79	7.34	15.86	4.55	14.28	0.94	99.06
16	15.00	0.85	8.56	45.72	34.41	48.69	3.21	96.79
17	16.00	0.90	9.79	132.91	121.60	170.29	11.23	88.77

Continuación

Muestra	tiempo (min)	t/to	pH	C (mg/L)	C-Co	$\Sigma$ ( C-Co)	F(t)	100-F(t)
18	17.00	0.96	10.40	225.64	214.33	384.62	25.36	74.64
19	18.00	1.01	10.88	342.20	330.89	715.52	47.18	52.82
20	19.00	1.07	10.98	373.22	361.91	34.7701	71.04	28.96
21	20.00	1.13	10.57	261.50	250.19	1327.62	87.54	12.46
22	21.00	1.18	10.02	162.27	150.96	1478.58	97.50	2.50
23	22.00	1.24	8.11	30.94	19.63	1498.21	98.79	1.21
24	23.00	1.30	7.35	16.00	4.69	1502.90	99.10	0.90
25	24.00	1.35	7.24	14.55	3.24	1506.14	99.31	0.69
26	26.00	1.47	7.13	13.22	1.91	1508.05	99.44	0.56
27	28.00	1.58	7.10	12.88	1.57	1509.62	99.54	0.46
28	30.00	1.69	7.09	12.77	1.46	1511.08	99.64	0.36
29	32.00	1.80	7.09	12.77	1.46	1512.54	99.74	0.26
30	34.00	1.92	7.09	12.77	1.46	1514.00	99.83	0.17
31	36.00	2.03	7.05	12.34	1.03	1515.03	99.90	0.10
32	38.00	2.14	7.05	12.34	1.03	1516.05	99.97	0.03
33	40.00	2.26	7.00	11.81	0.50	1516.56	100.00	0.00
34	42.00	2.37	6.95	11.31	0.00	1516.56	100.00	0.00
35	44.00	2.48	6.95	11.31	0.00	1516.56	100.00	0.00
36	46.00	2.59	6.95	11.31	0.00	1516.56	100.00	0.00

**4.2.2.4. Prueba de trazadores en el caso de un caudal  $Q=546.7l/s$**

Para la realización de este ensayo, se ha seguido el procedimiento descrito anteriormente, la curva de calibración para la determinación de la concentración en función del parámetro **pH** es la misma, del ensayo anterior, ya que este ensayo fue realizado el mismo día, y por ello con el mismo valor de **pHi**, el cual es fundamental para el cálculo de la curva de calibración. La curva de calibración se puede ver en la figura 18.

En la Tabla XXV, se presentan los datos obtenidos de la prueba de trazadores con el caudal  $Q = 546.7\text{l/s}$

**Tabla XXV. Resultados obtenidos de la prueba con trazadores para un caudal de  $Q=546.7\text{l/s}$**

Muestra	tiempo (min)	t/to	pH	C (mg/l)	C-Co	$\Sigma(C-Co)$	F(t)	100-F(t)
0	0.00	0.00	7.09	12.77	0.00	0.00	0.00	100.00
1	1.00	0.06	7.09	12.77	0.00	0.00	0.00	100.00
2	1.50	0.09	7.09	12.77	0.00	0.00	0.00	100.00
3	2.00	0.12	7.09	12.77	0.00	0.00	0.00	100.00
4	2.50	0.16	7.09	12.77	0.00	0.00	0.00	100.00
5	3.00	0.19	7.11	12.99	0.22	0.22	0.01	99.99
6	3.50	0.22	7.11	12.99	0.22	0.45	0.02	99.98
7	4.00	0.25	7.13	13.22	0.45	0.90	0.03	99.97
8	4.50	0.28	7.13	13.22	0.45	1.35	0.05	99.95
9	5.00	0.31	7.13	13.22	0.45	1.80	0.06	99.94
10	5.50	0.34	7.17	13.69	0.92	2.72	0.09	99.91
11	6.00	0.37	7.18	13.81	1.04	3.76	0.13	99.87
12	6.50	0.40	7.17	13.69	0.92	4.67	0.16	99.84
13	7.00	0.44	7.14	13.34	0.57	5.24	0.18	99.82
14	7.50	0.47	7.17	13.69	0.92	6.16	0.21	99.79
15	8.00	0.50	7.16	13.57	0.80	6.96	0.24	99.76
16	8.50	0.53	7.19	13.93	1.16	8.11	0.28	99.72
17	9.00	0.56	7.17	13.69	0.92	9.03	0.31	99.69
18	9.50	0.59	7.18	13.81	1.04	10.07	0.34	99.66
19	10.00	0.62	7.25	14.67	1.90	11.97	0.41	99.59
20	10.50	0.65	7.26	14.80	2.03	14.00	0.48	99.52
21	11.00	0.69	7.50	18.23	5.46	19.46	0.66	99.34
22	11.50	0.72	8.34	37.78	25.01	44.46	1.51	98.49
23	12.00	0.75	9.07	71.17	58.40	102.86	3.49	96.51
24	12.50	0.78	9.70	122.93	110.16	213.02	7.23	92.77
25	13.00	0.81	10.40	225.64	212.87	425.89	14.45	85.55

Continuación

Muestra	tiempo (min)	t/to	pH	C (mg/l)	C-Co	$\Sigma(C-Co)$	F(t)	100-F(t)
26	13.50	0.84	10.68	287.69	274.92	700.81	23.78	76.22
27	14.00	0.87	10.86	336.32	323.55	1024.35	34.76	65.24
28	14.50	0.90	10.98	373.22	360.45	1384.80	46.99	53.01
29	15.00	0.93	10.97	370.00	357.22	1742.03	59.12	40.88
30	15.50	0.97	10.87	339.25	326.48	2068.50	70.20	29.80
31	16.00	1.00	10.61	270.74	257.97	2326.47	78.95	21.05
32	16.50	1.03	10.30	206.89	194.12	2520.59	85.54	14.46
33	17.00	1.06	9.86	141.24	128.47	2649.06	89.90	10.10
34	17.50	1.09	9.47	100.69	87.92	2736.98	92.88	7.12
35	18.00	1.12	9.31	87.64	74.87	2811.85	95.42	4.58
36	18.50	1.15	8.80	56.30	43.53	2855.38	96.90	3.10
37	19.00	1.18	8.31	36.81	24.03	2879.42	97.71	2.29
38	19.50	1.21	8.03	28.87	16.10	2895.51	98.26	1.74
39	20.00	1.25	7.79	23.44	10.67	2906.18	98.62	1.38
40	20.50	1.28	7.62	20.23	7.46	2913.64	98.88	1.12
41	21.00	1.31	7.42	17.00	4.23	2917.87	99.02	0.98
42	21.50	1.34	7.32	15.59	2.82	2920.69	99.12	0.88
43	22.00	1.37	7.30	15.32	2.55	2923.24	99.20	0.80
44	22.50	1.40	7.29	15.19	2.42	2925.66	99.28	0.72
45	23.00	1.43	7.29	15.19	2.42	2928.08	99.37	0.63
46	23.50	1.46	7.36	16.14	3.37	2931.45	99.48	0.52
47	24.00	1.50	7.30	15.32	2.55	2934.01	99.57	0.43
48	26.00	1.62	7.30	15.32	2.55	2936.56	99.65	0.35
49	28.00	1.74	7.27	14.93	2.16	2938.72	99.73	0.27
50	30.00	1.87	7.27	14.93	2.16	2940.88	99.80	0.20
51	33.00	2.06	7.26	14.80	2.03	2942.91	99.87	0.13
52	36.00	2.24	7.25	14.67	1.90	2944.81	99.93	0.07
53	39.00	2.43	7.18	13.81	1.04	2945.84	99.97	0.03
54	40.00	2.49	7.16	13.57	0.80	2946.64	100.00	0.00
55	43.00	2.68	7.10	12.88	0.11	2946.76	100.00	0.00
56	53.00	3.30	7.09	12.77	0.00	2946.76	100.00	0.00
57	56.00	3.49	7.09	12.77	0.00	2946.76	100.00	0.00
58	59.00	3.68	7.09	12.77	0.00	2946.76	100.00	0.00
59	62.00	3.86	7.09	12.77	0.00	2946.76	100.00	0.00

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1. Análisis de los resultados obtenidos del ensayo de trazadores

En esta sección se analizará la prueba de trazadores, esta se puede realizar de dos maneras, la cuales son:

- Analizando la totalidad de la curva (Análisis por el Método De Wolf-Resnick).
- Analizando las tendencias centrales (Método por el Análisis de la Curva de tendencia de concentraciones del trazador).

Para analizar la totalidad de la curva se utilizan las ecuaciones de Wolf-Resnick. Para analizar las tendencias centrales se toman principalmente los siguientes parámetros:

- Relación entre tiempo inicial  **$t_i$**  de aparición del trazador y tiempo teórico de retención  **$t_o$**
- Relación entre tiempo modal  **$t_p$**  y tiempo teórico de retención  **$t_o$**
- La relación entre el tiempo que pasa el 90% del trazador y tiempo en que pasa el 10% del trazador (índice de Morril).

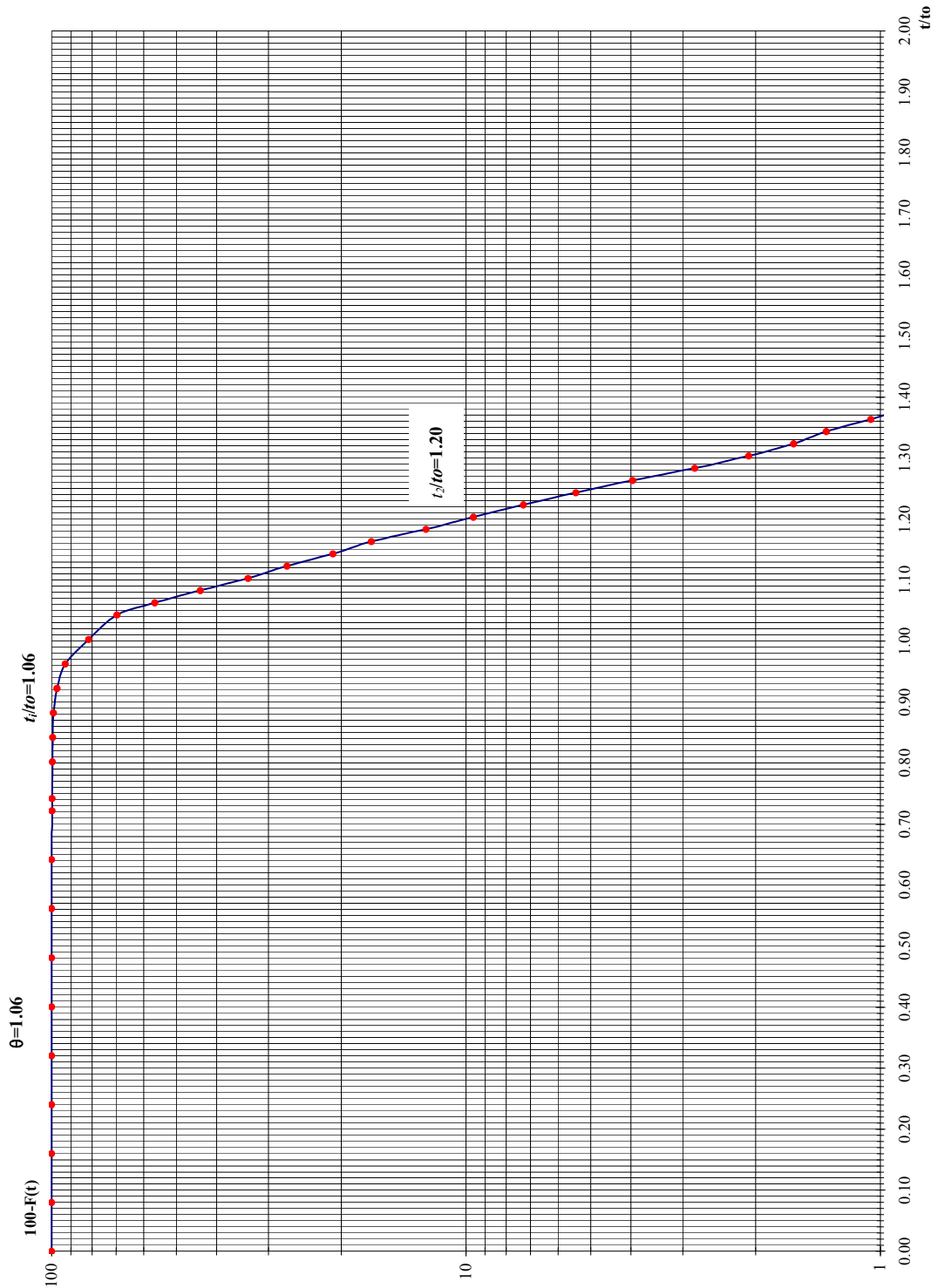
### **5.1.1. Análisis por el método de Wolf-Resnick**

#### **5.1.1.1. Análisis por el método de Wolf-Resnick para un caudal Q=320l/s**

Con los datos obtenidos en el ensayo de trazadores (para un caudal de Q=320l/s), se elaboro la Tabla XXI (sección 4.2.2.1), con los valores de  $t/t_0$  y  $100-F(t)$  se graficó en papel semilogaritmico; obteniéndose la curva de la figura 19.



Figura 19.  $t/t_0$  vrs.  $100-F(t)$  para un caudal de  $Q=320\text{l/s}$



En el proceso se utilizaron las ecuaciones indicadas a continuación:

$$\text{tg}(\alpha) = \frac{1}{\frac{t_2}{t_0} - \frac{t_1}{t_0}}$$

$$\text{tg}(\alpha) = \frac{1}{1.20 - 1.06} = 7.14; \alpha = \text{tg}^{-1}(7.14) \Rightarrow \alpha = 82.03^\circ$$

#### 5.1.1.1.1. Flujo de pistón

$$p = \frac{\theta * \text{tg}(\alpha)}{0.43429 + \theta * \text{tg}(\alpha)}$$

$$p = \frac{1.06 * 7.14}{0.43429 + 1.06 * 7.14} = 0.95 \Rightarrow p = 95\%$$

#### 5.1.1.1.2. Porcentaje de volumen considerado como zona muerta

$$M = 1 - \frac{\theta}{p}$$

$$M = 1 - \frac{1.06}{0.95} = -0.12 \Rightarrow \text{No hay zonas muertas}$$

#### 5.1.1.1.3. Flujo mezclado

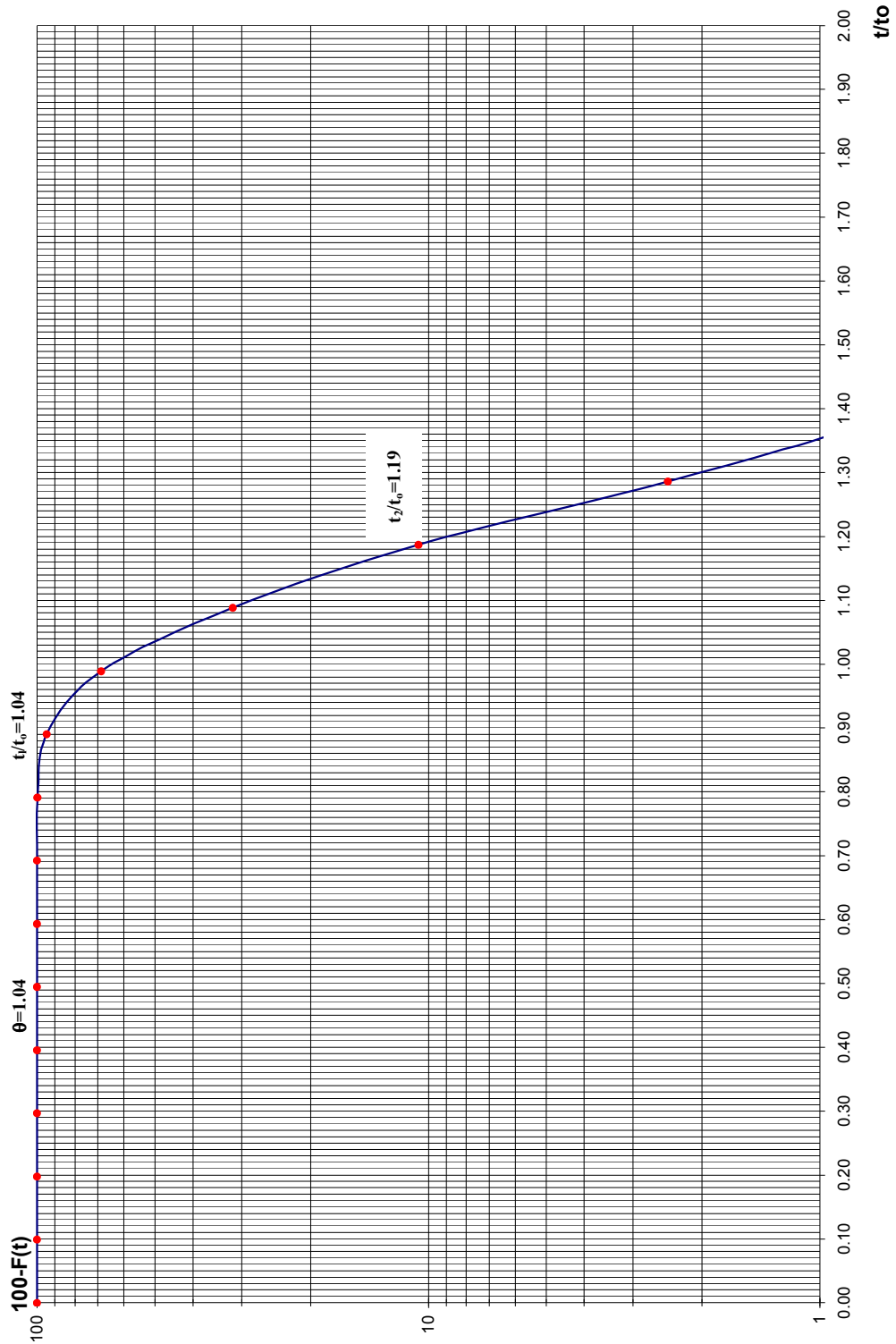
$$m = 1 - p$$

$$m = 1 - 0.95 = 0.05 \Rightarrow m = 5\%$$

#### 5.1.1.2. Análisis por el método de Wolf-Resnick para el caudal Q=416.0 l/s

Con los datos obtenidos en el primer ensayo (para un caudal de Q=416.0 l/s), se elaboró la Tabla XXIII (sección 4.2.2.2), con los valores de  $t/t_0$  y  $100-F(t)$  se graficó en papel semilogaritmico; obteniéndose la curva de la figura 20.

Figura 20.  $t/o$  vrs.  $100-F(t)$  para un caudal de  $Q=416.0$  l/s



En el proceso se utilizaron las ecuaciones indicadas a continuación:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{1}{\frac{t_2}{t_0} - \frac{t_1}{t_0}}$$

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{1}{1.19 - 1.04} = 6.67; \alpha = \operatorname{tg}^{-1}(6.67) \Rightarrow \alpha = 81.47^\circ$$

#### 5.1.1.2.1. Flujo de pistón

$$p = \frac{\theta * \operatorname{tg}(\alpha)}{0.43429 + \theta * \operatorname{tg}(\alpha)}$$

$$p = \frac{1.04 * 6.67}{0.43429 + 1.04 * 6.67} = 0.94 \Rightarrow p = 94\%$$

#### 5.1.1.2.2. Porcentaje de volumen considerado como zona muerta

$$M = 1 - \frac{\theta}{p}$$

$$M = 1 - \frac{1.04}{0.94} = -0.11 \Rightarrow \text{No hay zonas muertas}$$

#### 5.1.1.2.3. Flujo mezclado

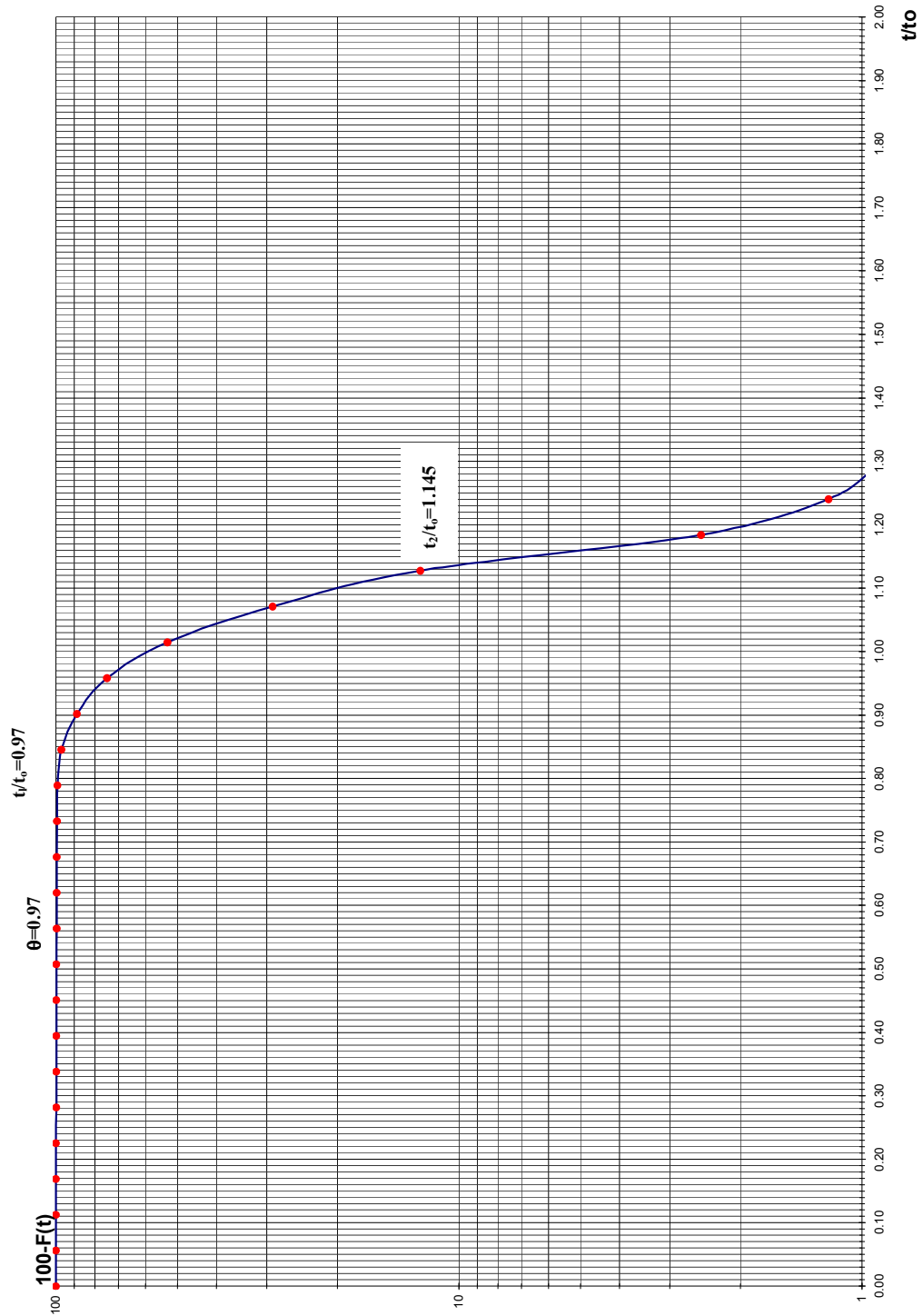
$$m = 1 - p$$

$$m = 1 - 0.94 = 0.06 \Rightarrow m = 6\%$$

#### 5.1.1.3. Análisis por el método de Wolf-Resnick para el caudal Q=480.0 l/s

Con los datos obtenidos en el primer ensayo (para un caudal de Q=480 l/s), se elaboró la Tabla XXIV (sección 4.2.2.3), con los valores de  $t/t_0$  y  $100-F(t)$  se graficó en papel semilogaritmico; obteniéndose la curva de la figura 21.

Figura 21.  $t/t_0$  vrs.  $100-F(t)$  para un caudal de  $Q=480.0$  l/s



En el proceso se utilizaron las ecuaciones indicadas a continuación:

$$\text{tg}(\alpha) = \frac{1}{\frac{t_2}{t_0} - \frac{t_1}{t_0}}$$

$$\text{tg}(\alpha) = \frac{1}{1.145 - 0.97} = 5.71; \alpha = \text{tg}^{-1}(5.71) \Rightarrow \alpha = 80.07^\circ$$

#### 5.1.1.3.1. Flujo de pistón

$$p = \frac{\theta * \text{tg}(\alpha)}{0.43429 + \theta * \text{tg}(\alpha)}$$

$$p = \frac{0.97 * 5.71}{0.43429 + 0.97 * 5.71} = 0.93 \Rightarrow p = 93\%$$

#### 5.1.1.3.2. Porcentaje de volumen considerado como zona muerta

$$M = 1 - \frac{\theta}{p}$$

$$M = 1 - \frac{0.97}{0.93} = -0.05 \Rightarrow \text{No hay zonas muertas}$$

#### 5.1.1.3.3. Flujo mezclado

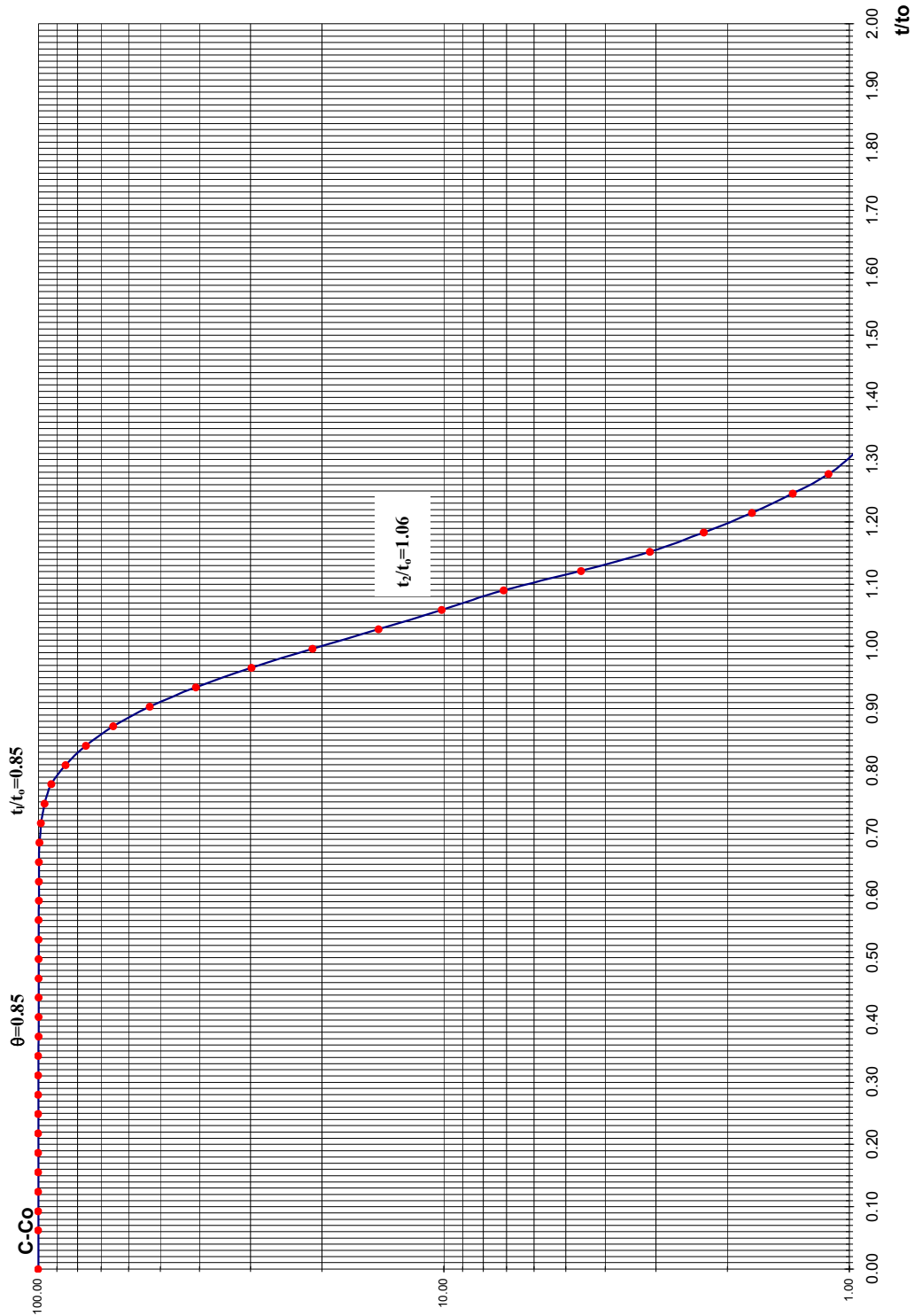
$$m = 1 - p$$

$$m = 1 - 0.93 = 0.07 \Rightarrow m = 7\%$$

#### 5.1.1.4. Análisis por el Método de Wolf-Resnick para un caudal Q=546.70l/s

Con los datos obtenidos en el primer ensayo (para un caudal de Q=547.70 l/s), se elaboró la Tabla XXV (sección 4.2.3.4), con los valores de  $t/t_0$  y  $100-F(t)$  se graficó en papel semilogaritmico; obteniéndose la curva de la figura 22.

Figura 22.  $t/t_0$  vrs.  $100-F(t)$  para un caudal de  $Q=546.70$  l/s



En el proceso se utilizaron las ecuaciones indicadas a continuación:

$$\text{tg}(\alpha) = \frac{1}{\frac{t_2}{t_o} - \frac{t_1}{t_o}}$$

$$\text{tg}(\alpha) = \frac{1}{1.06 - 0.85} = 4.76; \alpha = \text{tg}^{-1}(4.76) \Rightarrow \alpha = 78.14^\circ$$

#### 5.1.1.4.1. Flujo de pistón

$$p = \frac{\theta * \text{tg}(\alpha)}{0.43429 + \theta * \text{tg}(\alpha)}$$

$$p = \frac{0.85 * 4.76}{0.43429 + 0.85 * 4.76} = 0.90 \Rightarrow p = 90\%$$

#### 5.1.1.4.2. Porcentaje de volumen considerado como zona muerta

$$M = 1 - \frac{\theta}{p}$$

$$M = 1 - \frac{0.85}{0.90} = 0.06$$

#### 5.1.1.4.3. Flujo mezclado

$$m = 1 - p - M$$

$$m = 1 - 0.90 - 0.06 = 0.04 \Rightarrow m = 4\%$$



### 5.1.1.5. Resumen

En Tabla XXVI, se presenta el resumen de los resultados obtenidos utilizando el método de Wolf-Resnick.

**Tabla XXVI. Resumen de resultados (método de Wolf-Resnick)**

Caudal (l/s)	$t1/to$	$t2/to$	$\theta$	$tg(\alpha)$	$(\alpha)$	Flujo de pistón	$\rho\%$	Zona muerta	ZM %	Flujo mezclado	$m\%$
320.00	1.06	1.20	1.06	7.14	82.03	0.95	95.00	-0.12	0.00	0.05	5.00
416.00	1.04	1.19	1.04	6.67	81.47	0.94	94.00	-0.11	0.00	0.06	6.00
480.00	0.97	1.145	0.97	5.71	80.07	0.93	93.00	-0.05	0.00	0.07	7.00
546.70	0.85	1.06	0.85	4.76	78.14	0.90	90.00	0.06	6.00	0.04	4.00

### 5.1.2. Análisis de los resultados de la curva de tendencia de concentración del trazador

#### 5.1.2.1. Análisis de los resultados de la curva de tendencia de concentración del trazador para un caudal $Q=320l/s$

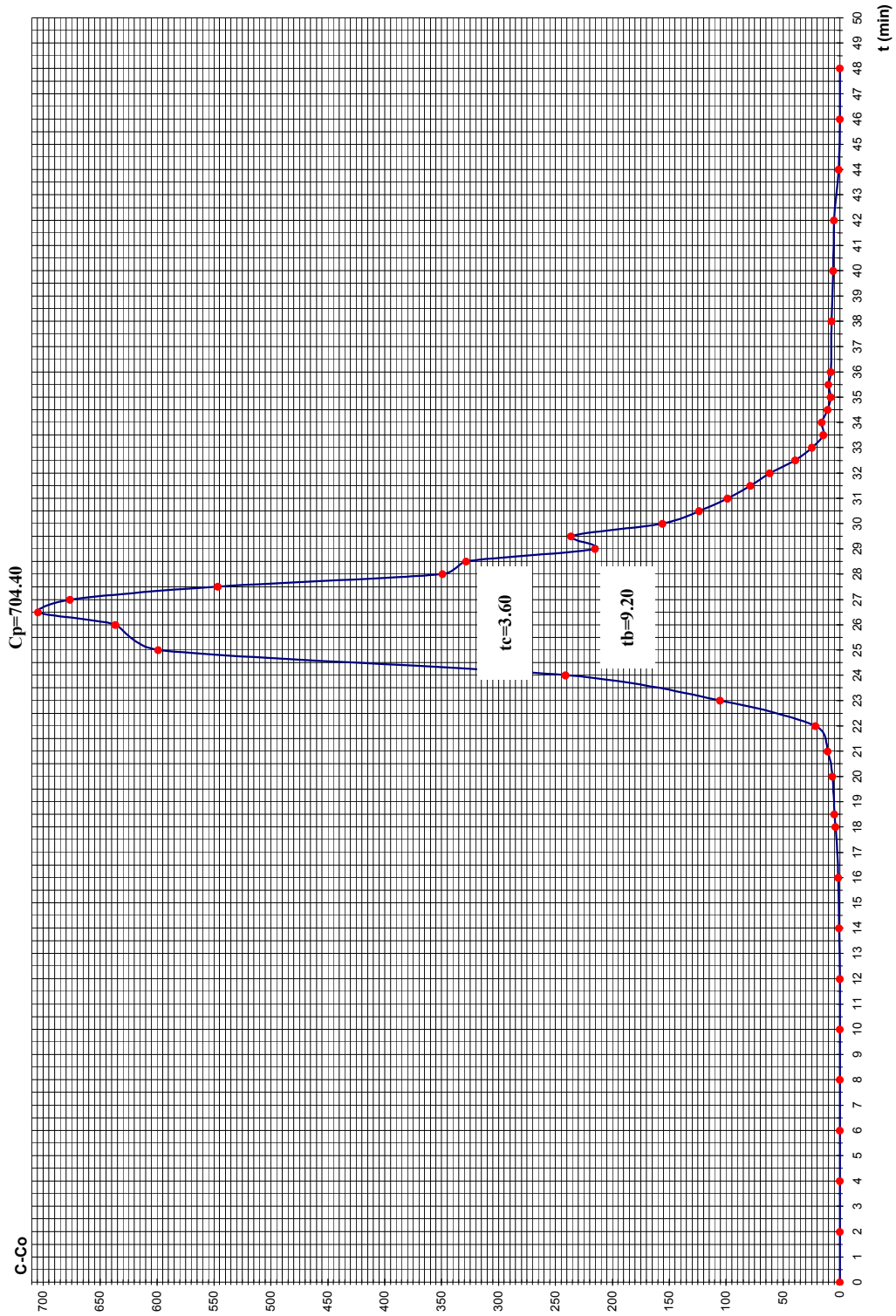
Con los datos obtenidos en este ensayo, (ver Tabla XXI), se elaboró la curva  $t$  vrs.  $C-Co$  (ver figura 23). En la Tabla XXVII se puede observar los valores obtenidos de la curva de la figura 23, la Tabla XXVIII (análisis del flujo), se hace el análisis de las relaciones de los datos obtenidos. En la Tabla XXVII se puede observar el valor  $tr=tm$  (ver sección 3.6.4. Análisis de la curva de tendencia de concentración del trazador)

**Tabla XXVII. Valores obtenidos de la figura 23**

Caudal $Q=320l/s$									
$t1$	$t10$	$tp$	$tm$	$to$	$t90$	$tf$	$Co$	$Cp$	$Cp/2$
12.00	24.23	26.50	26.75	25.30	29.93	44.00	6.98	704.40	352.20
$Cp/10$	$tc$	$tb$	$ti/to$	$tm/to$	$tp/to$	$tc/to$	$tb/to$	$e = \frac{(t_f - t_p) - (t_p - t_i)}{t_o}$	Índice Morril
70.44	3.60	9.20	0.47	1.06	1.05	0.14	0.36	0.12	1.24

**Nota:** los tiempos  $t_n$  están en minutos, las concentraciones  $C$  están en mg/l

Figura 23. Curva t vrs. C-Co para un caudal Q=320l/s



**Tabla XXVIII. Análisis del flujo para un caudal Q=320 l/s**

Caudal Q=320 l/s		
Criterio	Valor	Análisis
<b><i>ti/to</i></b>	0.47	Este valor indica que hay predominio de flujo mezclado, sin embargo este valor es muy cercano a 0.50, indicando de esta manera que el flujo mezclado es mínimo.
<b><i>tm/to</i></b>	1.06	El valor es mayor que la unidad, de tal manera que indica presencia de cortocircuitos, aunque no son tan grandes debido a la proximidad del valor a la unidad.
<b><i>tp/to</i></b>	1.05	Este valor indica que hay predominio de flujo de pistón, ya que es aproximadamente igual a la unidad.
<b><i>tc/to</i></b>	0.14	Este valor indica que no hay presencia de flujo mezclado ideal.
<b><i>tb/to</i></b>	0.36	Este valor indica que no hay presencia de flujo mezclado ideal.
$e = \frac{(t_f - t_p) - (t_p - t_i)}{t_o}$	0.12	Ya que este valor es aproximadamente igual a cero indica que hay predominio de flujo de pistón.

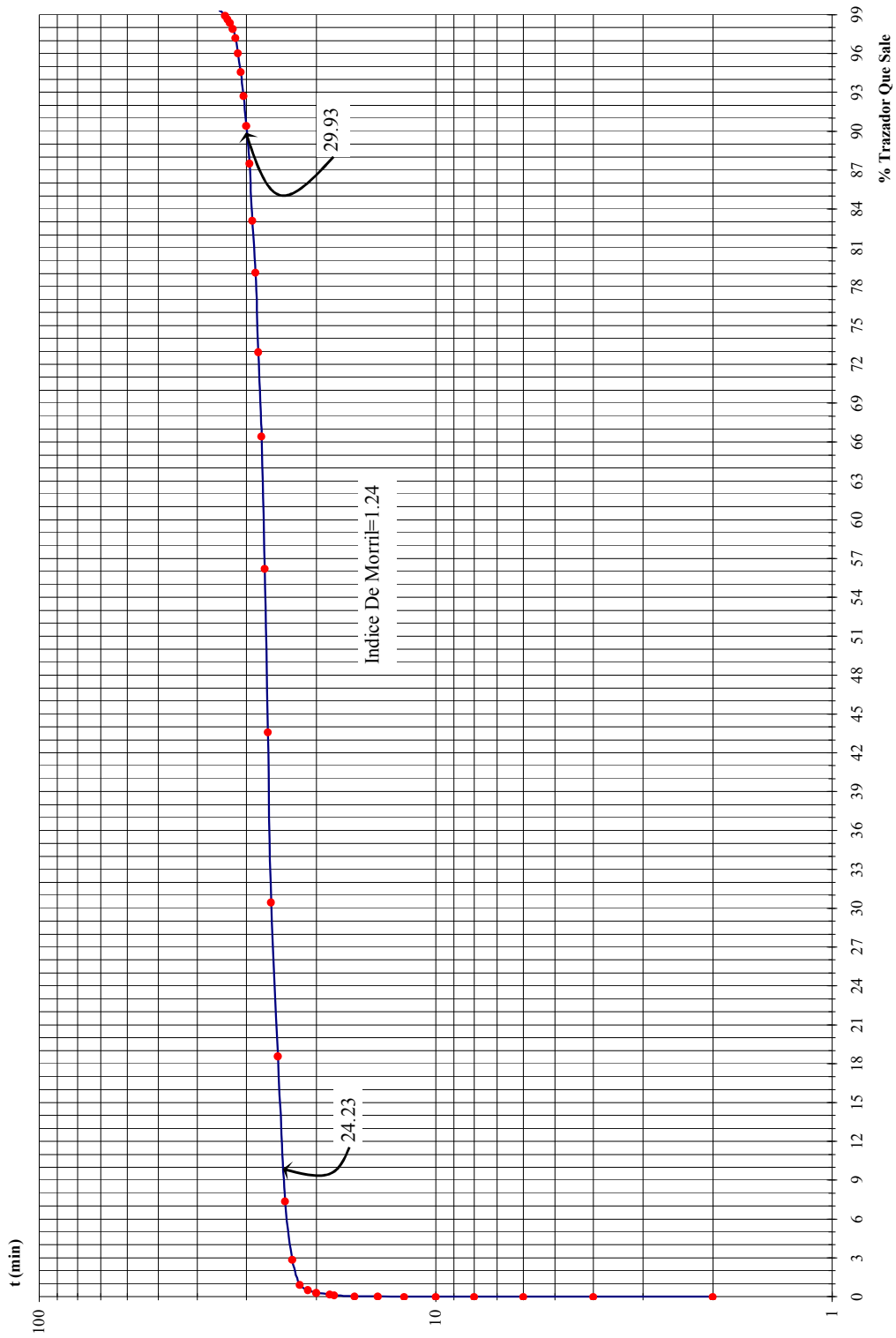
#### 5.1.2.1.1. Índice de Morril

Con los datos obtenidos en la prueba para un caudal Q=320l/s, (ver cuadro XXI) se obtuvo la curva F(t) vrs. tiempo (% de trazador que pasa por minuto), (ver figura 5.6, Curva del índice de Morril para un caudal Q=320 l/s) con la figura 24 se puede obtener los valores correspondientes a t10, t50, t90 o utilizando la ecuación 3.301, la que es más exacta que utilizando la figura 24 (ver sección 3.6.4).

$$\text{índice de Morril} = \frac{\text{Tiempo en que pasa el 90\%}}{\text{Tiempo en que pasa el 10\%}}$$

$$\text{índice de Morril} = \frac{29.93}{24.23} = 1.24$$

Figura 24. Curva del índice de Morril para un caudal Q=320 l/s



Ya que este valor, del índice de Morril se aproxima a 1 se considera que hay predominancia de flujo de pistón.

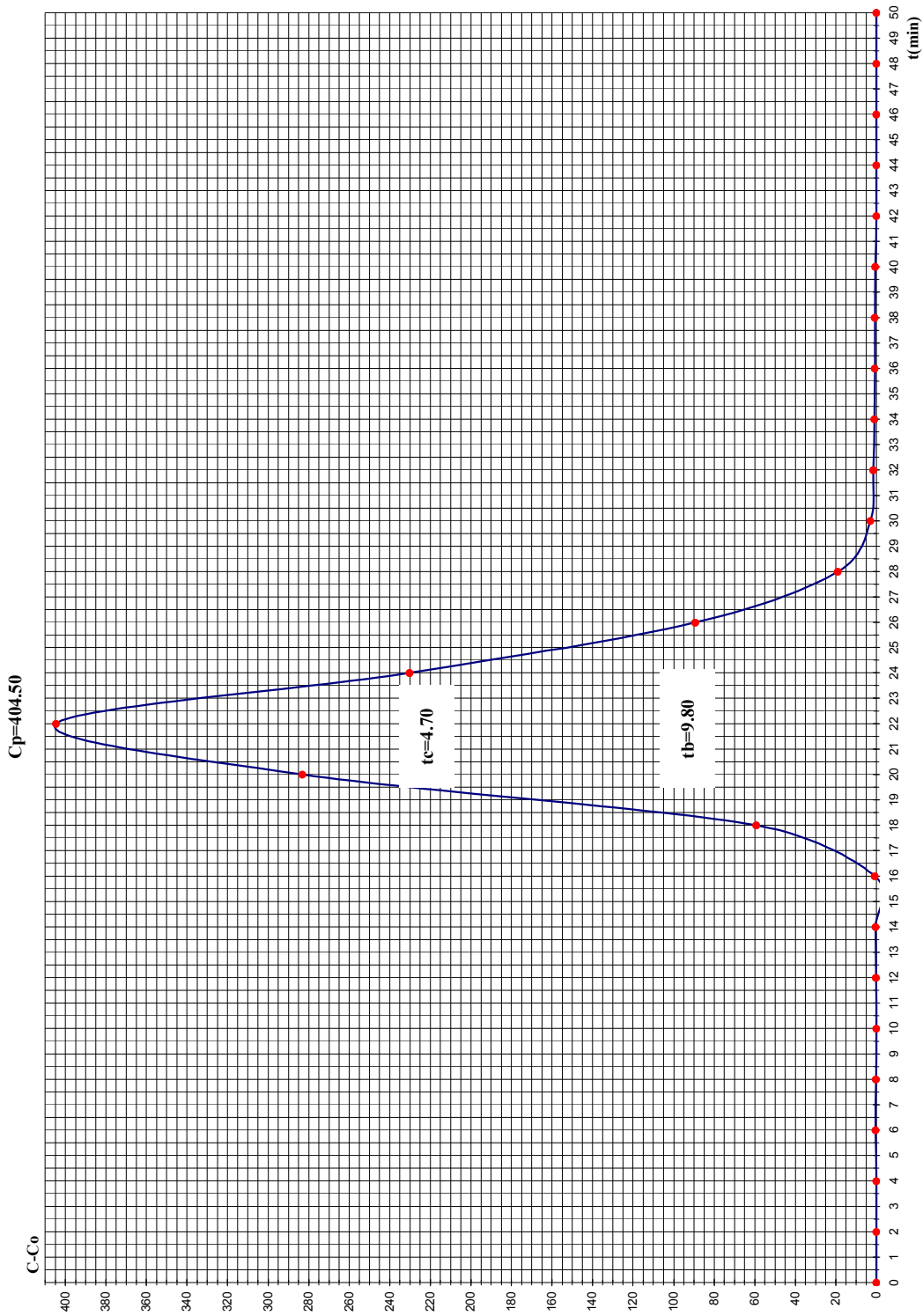
### 5.1.2.2. Análisis de los resultados de la curva de tendencia de concentración del trazador para un caudal Q=416.0 l/s

Con los datos obtenidos en este ensayo, (ver Tabla XXIII), se elaboro la curva t vrs. C-Co (ver figura 25). En la Tabla XXIX se puede observar los valores obtenidos de la curva de la figura 25. En la Tabla XXIX se puede observar el valor  $tr=tm$  (ver sección 3.6.4. Análisis de la curva de tendencia de concentración del trazador).

Tabla XXIX. Valores obtenidos de la figura 25

Caudal Q=416l/s									
<b>t1</b>	<b>t10</b>	<b>tp</b>	<b>tm</b>	<b>to</b>	<b>t90</b>	<b>tf</b>	<b>Co</b>	<b>Cp</b>	<b>Cp/2</b>
6.00	18.34	22.00	21.01	20.21	24.17	42.00	9.67	404.50	202.25
<b>Cp/10</b>	<b>tc</b>	<b>tb</b>	<b>ti/to</b>	<b>tm/to</b>	<b>tp/to</b>	<b>tc/to</b>	<b>tb/to</b>	$e = \frac{(t_f - t_p) - (t_p - t_i)}{t_o}$	Índice Morril
40.45	4.70	9.80	0.30	1.04	1.09	0.23	0.48	0.20	1.32

Figura 25. Curva t vrs. C-Co para un caudal Q=416.0 l/s



**Tabla XXX. Análisis del flujo para un caudal Q=416.0 l/s**

Caudal Q=416 l/s		
Criterio	Valor	Análisis
<b><i>ti/to</i></b>	0.30	Este valor indica que hay presencia de flujo mezclado.
<b><i>tm/to</i></b>	1.04	El valor es mayor que la unidad, de tal manera que indica presencia de cortocircuitos, aunque no son tan grandes debido a la proximidad del valor a la unidad.
<b><i>tp/to</i></b>	1.09	Este valor indica que hay predominio de flujo de pistón, ya que es aproximadamente igual a la unidad.
<b><i>tc/to</i></b>	0.23	Este valor indica que no hay presencia de flujo mezclado ideal.
<b><i>tb/to</i></b>	0.48	Este valor indica que no hay presencia de flujo mezclado ideal.
$e = \frac{(t_f - t_p) - (t_p - t_i)}{t_o}$	0.20	Ya que este valor es aproximadamente igual a cero indica que hay predominio de flujo de pistón.

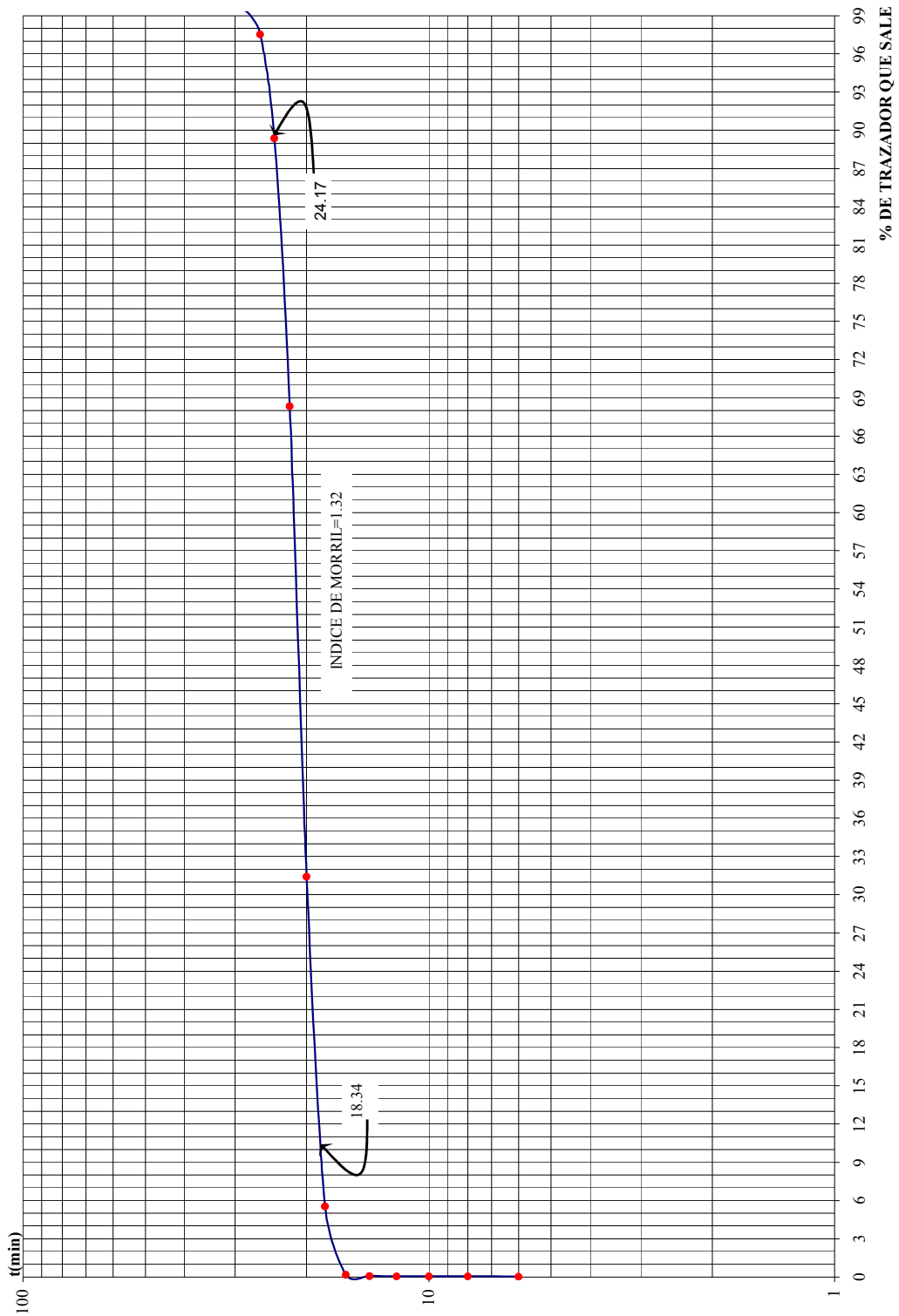
#### 5.1.2.2.1. Índice de Morril

Con los datos obtenidos en la prueba para un caudal Q=416.0 l/s, (ver Tabla XXIII) se obtuvo la curva F(t) vrs. tiempo (% de trazador que pasa por minuto), (ver figura 26 curva del índice de Morril para un caudal Q=416.0 l/s) con la figura 26 se puede obtener los valores correspondientes a t10, t50, t90 o utilizando la ecuación 3.30.1 la que es mas exacta que utilizando la figura 26 (ver sección 3.6.4).

$$\text{índice de Morril} = \frac{\text{Tiempo en que pasa el 90\%}}{\text{Tiempo en que pasa el 10\%}}$$

$$\text{Índice de Morril} = \frac{24.17}{18.34} = 1.32$$

Figura 26. Curva del índice de Morril para un caudal Q=416.0 l/s





Ya que este valor, del índice de Morril se aproxima a 1 se considera que hay predominancia de flujo de pistón.

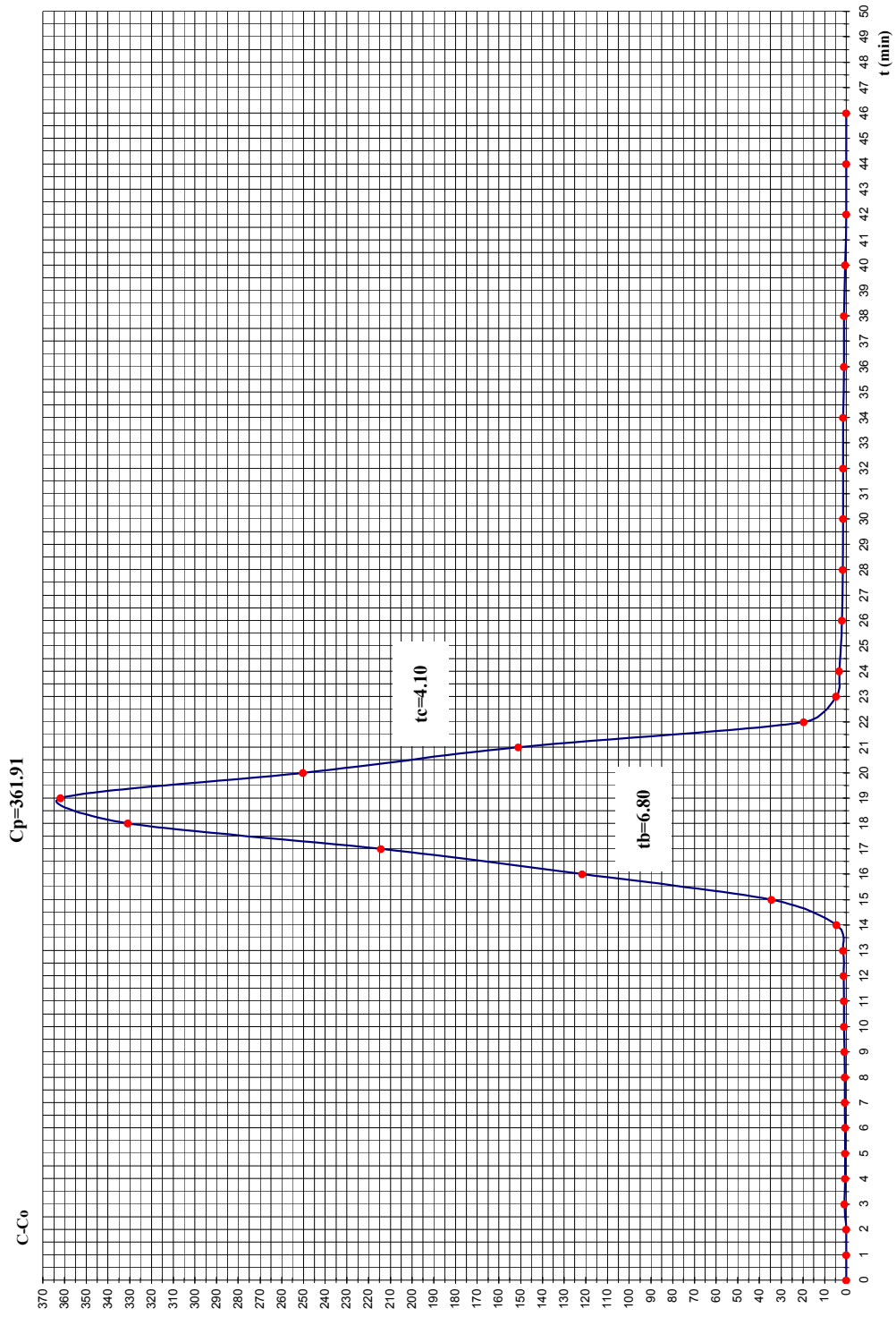
### 5.1.2.3. Análisis de los resultados de la curva de tendencia de concentración del trazador para un caudal Q=480.0 l/s

Con los datos obtenidos en este ensayo, (ver la Tabla XXIV), se elaboro la curva t vrs. C-Co (ver figura 27). En la Tabla XXXI se puede observar los valores obtenidos de la curva de la figura 27 En la Tabla XXXI se puede observar el valor  $tr=tm$  (ver sección 3.6.4. Análisis de la curva de tendencia de concentración del trazador).

Tabla XXXI. Valores obtenidos de la figura 27

Caudal Q=480 l/s									
<i>t1</i>	<i>t10</i>	<i>tp</i>	<i>tm</i>	<i>to</i>	<i>t90</i>	<i>tf</i>	<i>Co</i>	<i>Cp</i>	<i>Cp/2</i>
3.00	15.85	19.00	18.12	17.74	20.25	40.00	11.31	361.91	180.95
<i>Cp/10</i>	<i>tc</i>	<i>tb</i>	<i>ti/to</i>	<i>tm/to</i>	<i>tp/to</i>	<i>tc/to</i>	<i>tb/to</i>	$e = \frac{(t_f - t_p) - (t_p - t_i)}{t_o}$	Índice Morril
36.19	4.10	6.80	0.17	1.02	1.07	0.23	0.38	0.28	1.28

Figura 27. Curva t vrs. C-Co para un caudal Q=480.0 l/s



**Tabla XXXII. Análisis del flujo para un caudal Q=480.0 l/s**

Caudal Q=480 l/s		
Criterio	Valor	Análisis
<b><i>ti/to</i></b>	0.17	Este valor indica que hay presencia de flujo mezclado.
<b><i>tm/to</i></b>	1.02	El valor es mayor que la unidad, de tal manera que indica presencia de cortocircuitos, aunque no son tan grandes debido a la proximidad del valor a la unidad.
<b><i>tp/to</i></b>	1.07	Este valor indica que hay predominio de flujo de pistón, ya que es aproximadamente igual a la unidad.
<b><i>tc/to</i></b>	0.23	Este valor indica que no hay presencia de flujo mezclado ideal.
<b><i>tb/to</i></b>	0.38	Este valor indica que no hay presencia de flujo mezclado ideal.
$e = \frac{(t_f - t_p) - (t_p - t_i)}{t_o}$	0.28	Ya que este valor es aproximadamente igual a cero indica que hay predominio de flujo de pistón.

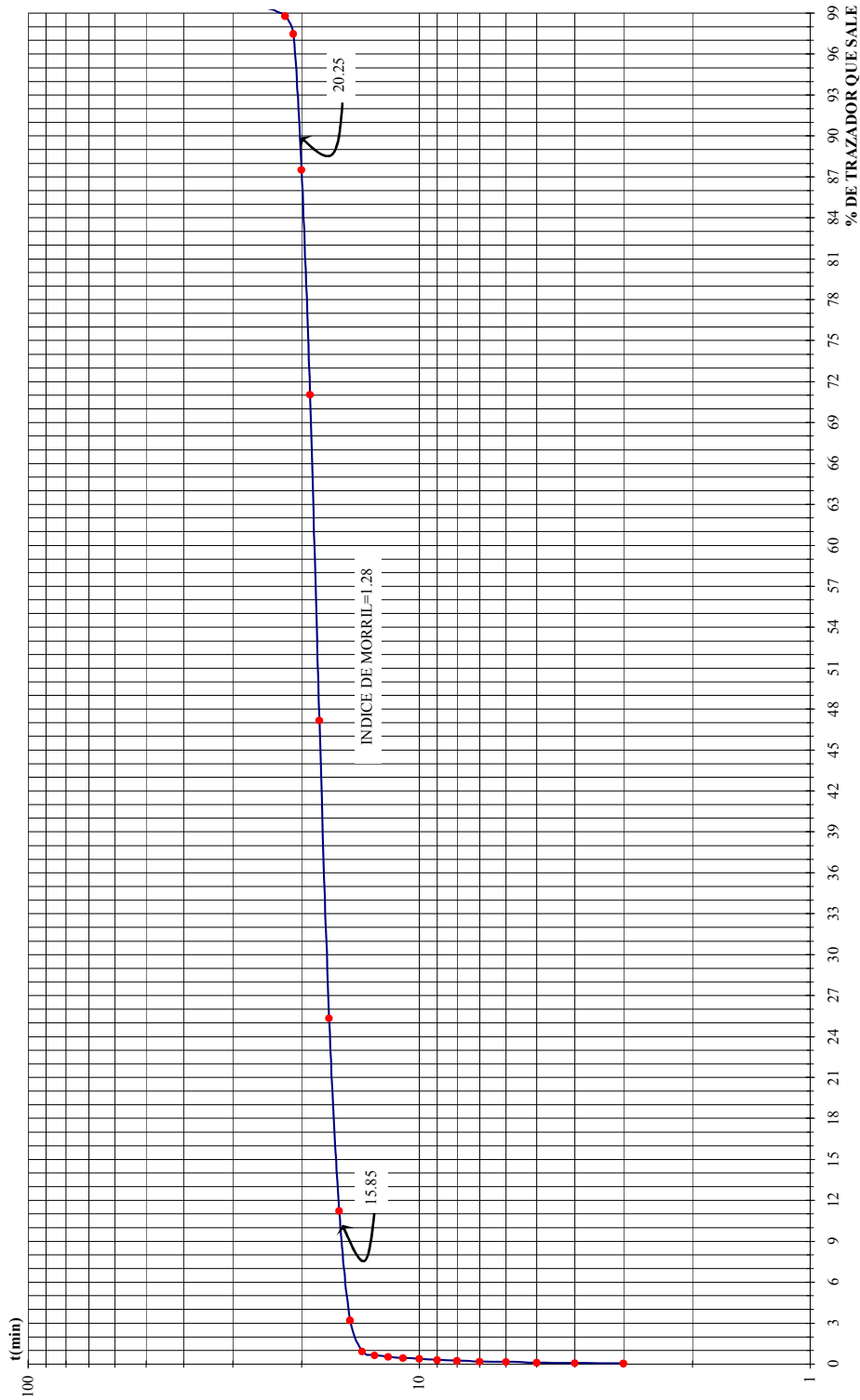
#### 5.1.2.3.1. Índice de Morril

Con los datos obtenidos en la prueba para un caudal Q=480.0 l/s, (ver Tabla XXIV) se obtuvo la curva F(t) vrs. tiempo (% de trazador que pasa por minuto), (ver figura 28, Curva del índice de Morril para un caudal Q=480.0 l/s) con la figura 28 se puede obtener los valores correspondientes a t10, t50, t90 o utilizando la ecuación 3.30.1, la que es mas exacta que utilizando la figura 28 ( ver sección 3.6.4).

$$\text{índice de Morril} = \frac{\text{Tiempo en que pasa el 90\%}}{\text{Tiempo en que pasa el 10\%}}$$

$$\text{Índice de Morril} = \frac{20.25}{15.85} = 1.28$$

Figura 28. Curva del índice de Morril para un caudal Q=480.0 l/s



Ya que este valor, del índice de Morril se aproxima a 1 se considera que hay predominancia de flujo de pistón

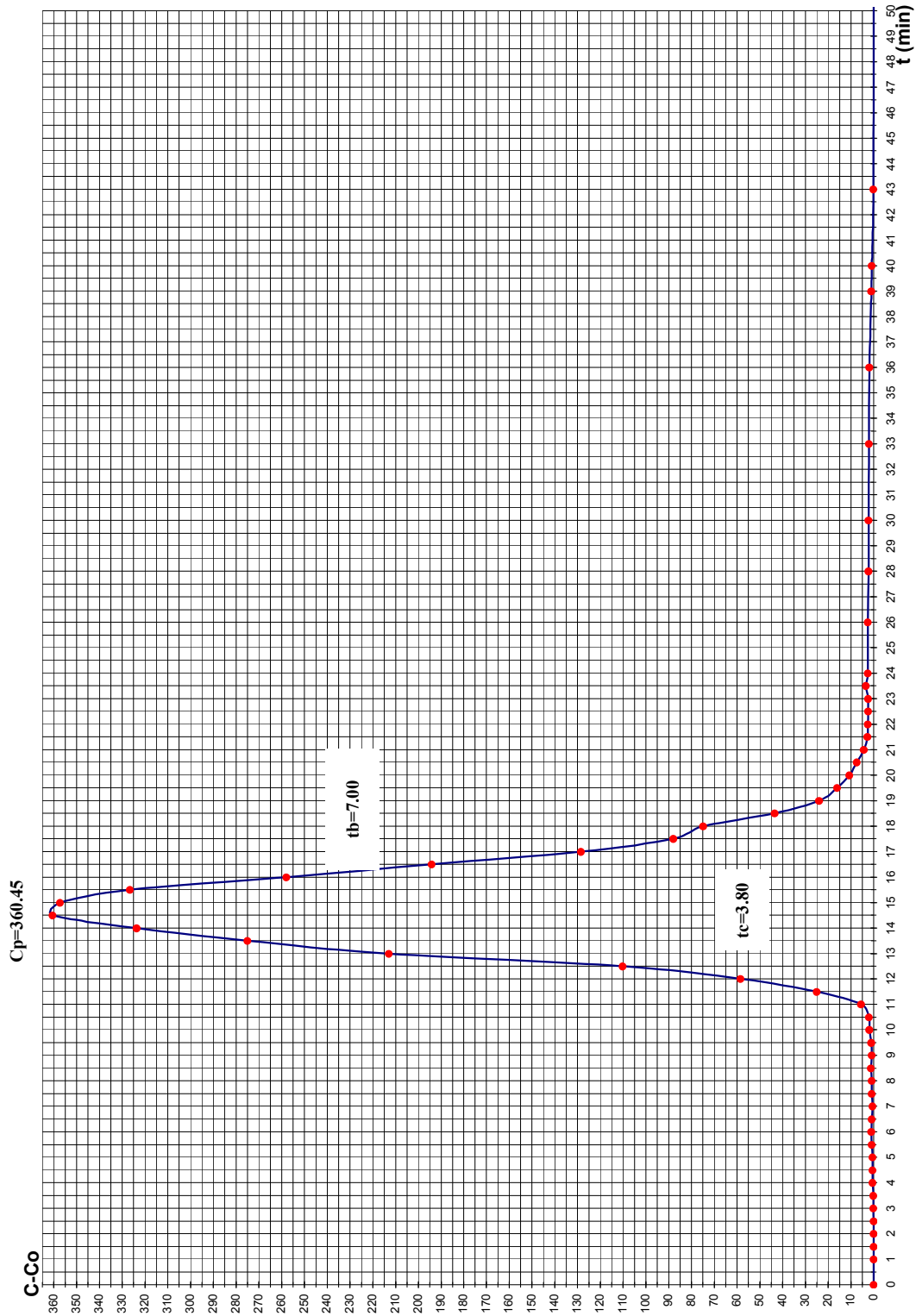
#### 5.1.2.4. Análisis de los resultados de la curva de tendencia de concentración del trazador para un caudal Q=546.47l/s

Con los datos obtenidos en este ensayo, (ver Tabla XXV), se elaboro la curva t vrs. C-Co (ver figura 29). En la Tabla XXXIII se puede observar los valores obtenidos de la curva de la figura 29. En la Tabla XXXIII se puede observar el valor  $tr=tm$  (ver sección 3.6.4. Análisis de la curva de tendencia de concentración del trazador).

Tabla XXXIII. Valores obtenidos de la figura 29

Caudal Q=546.7 l/s									
<i>t1</i>	<i>t10</i>	<i>tp</i>	<i>tm</i>	<i>to</i>	<i>t90</i>	<i>tf</i>	<i>Co</i>	<i>Cp</i>	<i>Cp/2</i>
3.00	12.69	14.50	14.62	16.05	17.02	40.00	12.77	360.45	180.22
<i>Cp/10</i>	<i>tc</i>	<i>tb</i>	<i>ti/to</i>	<i>tm/to</i>	<i>tp/to</i>	<i>tc/to</i>	<i>tb/to</i>	$e = \frac{(t_f - t_p) - (t_p - t_i)}{t_o}$	Índice Morril
36.04	3.80	7.00	0.19	0.91	0.90	0.24	0.44	0.87	1.34

Figura 29. Curva t vrs. C-Co para un caudal Q=546.47 l/s



**Tabla XXXIV. Análisis del flujo para un caudal Q=546.47l/s**

Caudal Q=546.7 l/s		
Criterio	Valor	Análisis
<b><i>ti/to</i></b>	0,19	Este valor indica que hay presencia de flujo mezclado.
<b><i>tm/to</i></b>	0,91	El valor es menor que la unidad, de tal manera que indica presencia de zonas muertas, aunque no son tan grandes debido a la proximidad del valor a la unidad.
<b><i>tp/to</i></b>	0,90	Este valor indica que hay predominio de flujo de pistón, ya que es aproximadamente igual a la unidad.
<b><i>tc/to</i></b>	0,24	Este valor indica que no hay presencia de flujo mezclado ideal.
<b><i>tb/to</i></b>	0,44	Este valor indica que no hay presencia de flujo mezclado ideal.
$e = \frac{(t_f - t_p) - (t_p - t_i)}{t_o}$	0,87	Este valor se aproxima a cero esto indica que hay predominio de flujo de pistón.

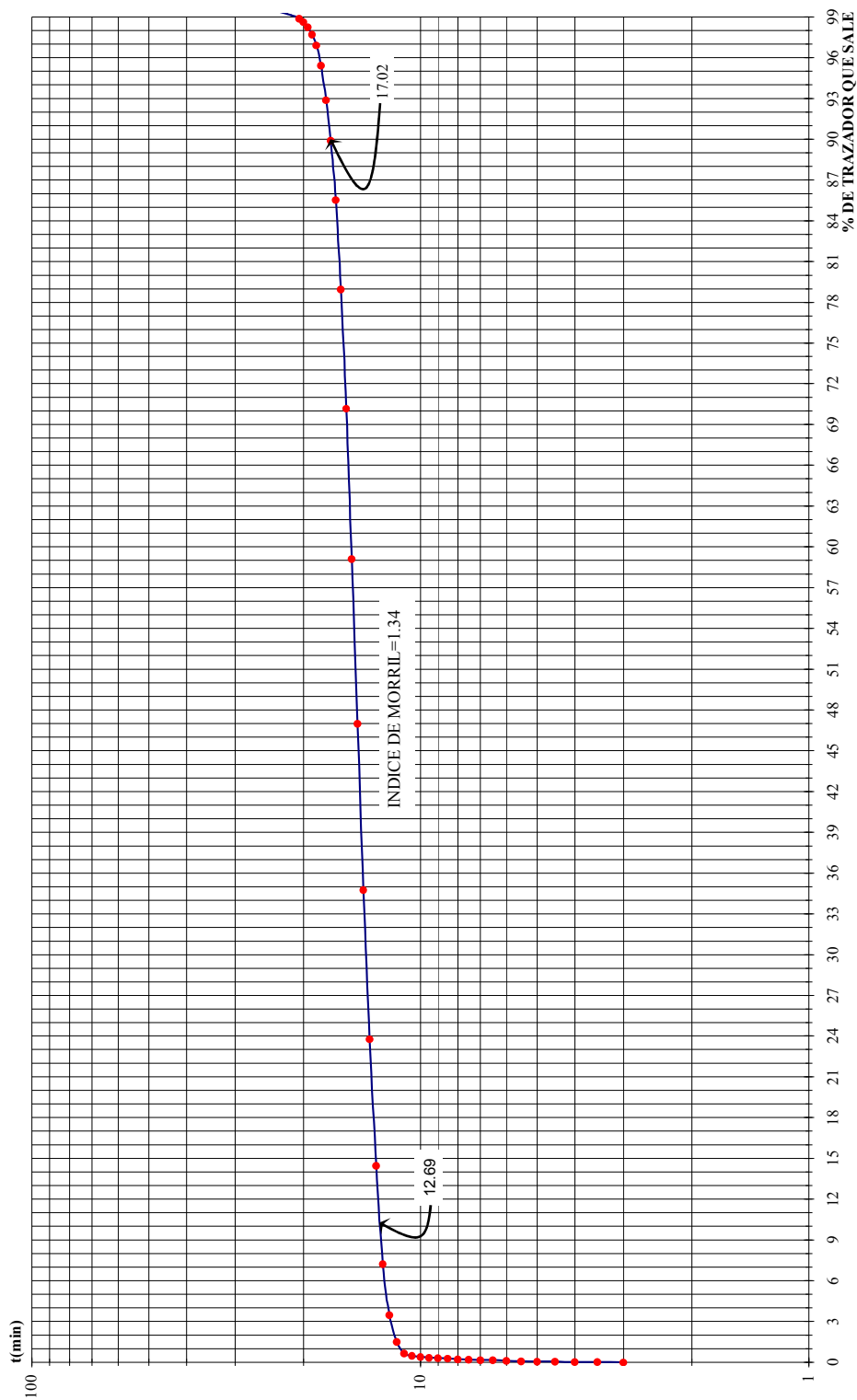
#### 5.1.2.4.1. Índice de Morril

Con los datos obtenidos en la prueba para un caudal Q=546.47 l/s, (ver Tabla XXIV) se obtuvo la curva F(t) vrs. tiempo (% de trazador que pasa por minuto), (ver figura 30, Curva del índice de Morril para un caudal Q=546.47 l/s) con la figura 30 se puede obtener los valores correspondientes a t10, t50, t90 o utilizando la ecuación 3.30.1, la que es mas exacta que utilizando la figura 30 ( ver sección 3.6.4).

$$\text{índice de Morril} = \frac{\text{Tiempo en que pasa el 90\%}}{\text{Tiempo en que pasa el 10\%}}$$

$$\text{Índice de Morril} = \frac{17.02}{12.69} = 1.34$$

Figura 30. Curva del índice de Morril para un caudal Q=546.47 l/s





Ya que este valor, del índice de Morril se aproxima a 1 se considera que hay predominancia de flujo de pistón.

## 5.2. Análisis e interpretación de los parámetros en estudio

En esta sección se analizan y comparan los parámetros obtenidos de los distintos ensayos, con los parámetros de diseño.

### 5.2.1. Análisis y comparación de los tiempos de retención

Para analizar y comparara los distintos tiempos de retención, se presenta la Tabla XXXV donde se enuncian los resultados para los distintos casos de comparación.

**Tabla XXXV. Tiempos de retención por tramo para los diferentes caudales.**

Caudal	Tramo 1 (min)	Tramo 2 (min)	Tramo 3 (min)	Tramo 4 (min)	Tiempo Real En La Unidad (min)
320.00	6.57	6.70	6.74	6.74	26.75
416.00	5.28	5.30	5.24	5.19	21.01
480.00	4.64	4.59	4.49	4.40	18.12
546.70	3.80	3.72	3.60	3.50	14.62

**Tabla XXXVI. Tiempos de retención para los diferentes caudales.**

Caudal (l/s)	Tiempo de retención de diseño (tdis)	Tiempo teórico de retención (to)	Tiempo real de retención (tr)
320.00	25.2	25.30	26.75
416.00	19.4	20.21	21.01
480.00	16.8	17.74	18.12
546.70	----	16.05	14.62

Para el caudal  $Q=546.7\text{ l/s}$  no hay valores de parámetros de diseño, ya que este caudal es correspondiente al caudal máximo histórico y no fue previsto en el diseño de los floculadores, sin embargo ha sido tratado en la planta. El caudal máximo servirá para ver el comportamiento de los parámetros ( $tr$ ,  $G$ ) y de esta manera poder determinar un rango de caudales superior al de diseño, en el Apéndice I se dará una mayor explicación de cómo se relacionaron los parámetros obtenidos del análisis del rango de caudales en estudio.

La serie de valores correspondientes a los tiempos de retención, teóricos, de diseño y reales, para cada caudal están dentro del rango recomendado en el diseño ( $15 \leq t \leq 30$ ) estos valores son importantes para determinar cual es el rango de los caudales en los que cumple tanto el tiempo de retención ( $tr$ ) como el gradiente de velocidad ( $G$ ). Se puede apreciar que el comportamiento de los tiempos teóricos y reales es de forma descendente, este comportamiento es lógico ya que al aumentar el caudal disminuye el tiempo de retención.

Al analizar los tiempos reales con respecto a los tiempos teóricos, se puede apreciar que la mayoría de estos valores son menores a los tiempos reales, con excepción del tiempo correspondiente al caudal  $Q=546.7\text{ l/s}$  en el que el tiempo real es menor al tiempo teórico, pero este valor no es tan grande ya que la relación entre el tiempo teórico  $t_0$  y el tiempo real  $tr$  es aproximadamente igual a la unidad, por lo tanto no afecta el flujo de pistón. Para el caso de los demás caudales los tiempos reales son menores a los tiempos teóricos esto indica presencia de zonas muertas, sin embargo los valores son muy pequeños y no afectan la condición de flujo de pistón (ver secciones 5.1.1. y 5.1.2).

Los valores correspondientes a los tiempos teóricos y a los tiempos reales son relativamente iguales, esto quiere decir que existe y ratifica que las

unidades de floculación poseen un porcentaje elevado y aceptable de flujo de pistón.

### 5.2.2. Análisis y comparación de los gradientes de velocidad ( $G$ )

Para analizar y comparara los distintos gradientes de velocidad ( $G$ ), se presenta la Tabla XXXVII donde se enuncian los resultados para los distintos casos del análisis.

**Tabla XXXVII. Gradientes de velocidad para los diferentes casos**

Caudal (l/s)	Condición	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4
320.00	Teórica	39.72	28.47	26.09	20.73
	Real	64.41	36.59	24.24	22.71
	De Diseño	48.00	31.00	23.00	16.00
416.00	Teórica	53.64	39.59	37.07	29.91
	Real	75.71	49.19	40.05	32.56
	De Diseño	72.00	46.00	35.00	25.00
480.00	Teórica	63.44	47.87	45.60	37.25
	Real	86.75	58.41	48.21	40.20
	De Diseño	89.00	56.00	44.00	31.00
546.70	Teórica	72.07	55.07	53.42	44.31
	Real	100.20	73.09	61.83	52.22
	De Diseño	---	---	---	---

Los gradientes de velocidad  $G$  en el primer tramo son grandes, esto se da ya que a la entrada de cada floculador existe un canal parshall, el que genera un resalto hidráulico en el que da origen a gradientes demasiado grandes, los que afectan al proceso de floculación. Al continuar con los demás tramos se puede apreciar que los gradientes se normalizan gradualmente, permaneciendo en el rango considerado en el diseño de la planta  $10 \leq G \leq 100$ . De esta manera se puede apreciar que los valores correspondientes a los

gradientes reales son relativamente iguales a los de diseño, comprobándose así que la planta esta operando de acuerdo a su diseño.

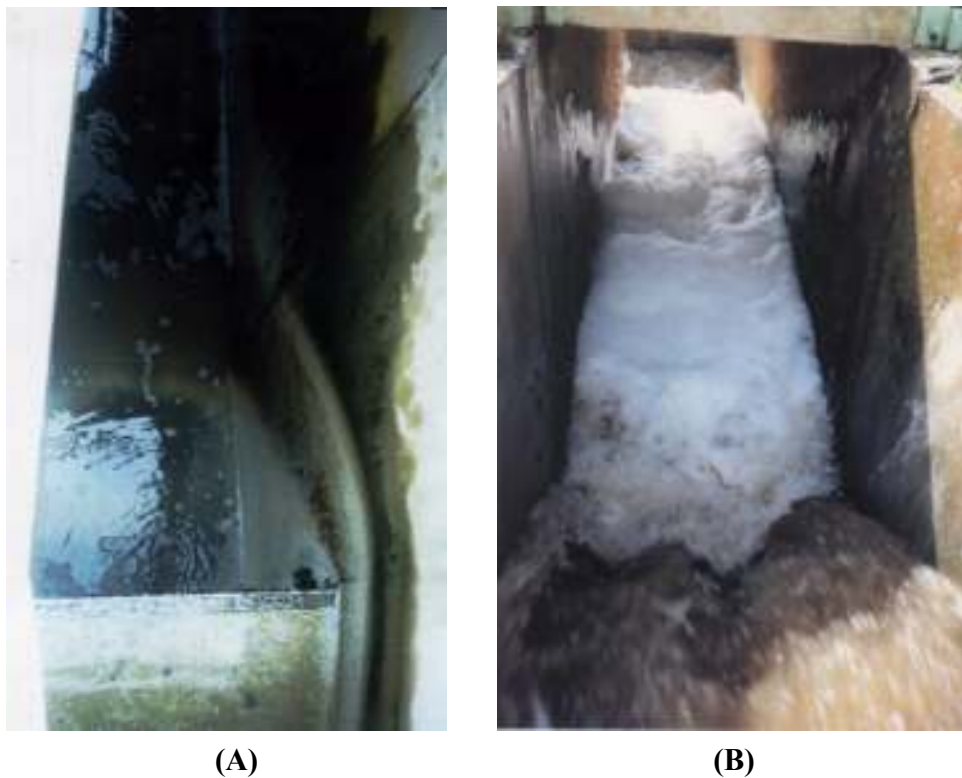
Al analizar los valores correspondientes a los gradientes teóricos con respecto a los gradientes reales se puede observar que en cada caudal, y en cada tramo (1 y 4) los gradientes teóricos son menores a los gradientes reales, esta situación se da por que los modelos matemáticos no toman en cuenta las verdaderas condiciones físicas y geométricas de una determinada unidad, esto indica valores ideales.

Aunque efectivamente se ve que los parámetros reales se asemejan a los parámetros de diseño, esto indica que la planta opera con las condiciones tomadas en cuenta en el diseño, sin embargo la planta fue diseñada de acuerdo a la tecnología adecuada a su época, (en la década de los años 70's y recomendada por estudios previos a esta época, ver apéndice II), en la actualidad los estudios para el diseño de plantas de tratamiento de agua potable han avanzado, y por lo tanto las condiciones de diseño de plantas han variado, se puede mencionar que actualmente las plantas de tratamiento de agua potable de Latinoamérica se diseñan con tecnología actual recomendada por **Programa De Mejoramiento De Calidad Del Agua Para Consumo Humano, Del Centro Panamericano De Ingeniería Sanitaria Y Ciencias Del Ambiente (CEPIS), Organización Panamericana De La Salud (OPS) Y Organización Mundial De La Salud (OMS).**

En la figura 31 se presenta la entrada a los floculadores, inmediatamente después del parshall secundarios. Se puede observar la turbulencia generada por los parshall que a su vez dan origen a gradientes de velocidad grandes. En la figura 32 se puede ver que el primer canal y el segundo canal están siendo afectados por la turbulencia que el parshall secundario genera.

En la figura 32 se presentan elementos como la válvula de mariposa antes de los parshall y que también dan origen a gradientes de velocidad grandes.

**Figura 31. Fotografía de la entrada de la unidad de floculación**



- A) Fotografía de la entrada del floculador con la válvula de mariposa cerrada
- B) Fotografía de la entrada del floculador con la válvula de mariposa abierta.

**Figura 32. Fotografía de los elementos de importancia de la unidades de floculación**



Parshall secundario



Canales 1 Y 2 del tramo 1



Válvula de mariposa antes del parshall secundario

## CONCLUSIONES

1. Del análisis realizado el tiempo real de retención es de  $tr= 26.75$  minutos por cada unidad de floculación, para el caudal medio de diseño de 960l/s, recordando que la planta opera normalmente con tres floculadores.
2. Para el caudal máximo de diseño  $Q=1248$  l/s el tiempo real de retención es de  $tr=21.01$  minutos por cada unidad de floculación, operando con tres unidades.
3. Los gradientes determinados en los ensayos varían entre  $22.71 \leq G \leq 100.20$  por cada unidad de floculación, para el rango de caudales considerado en el diseño  $960 \text{ l/s} \leq Q \leq 1248 \text{ l/s}$ .
4. Los valores de tiempo de retención y gradientes de velocidad encontrados se consideran adecuados, porque cumplen con los rangos de diseño, además de que son bastante próximos a los valores recomendados por criterios de diseño de otros autores. (Ver apéndice B).
5. Existe una diferencia grande entre el nivel de agua y el borde de las paredes de los floculadores, lo que es indicativo de volumen desaprovechado en las unidades de la planta lo de Coy. La diferencia medida varía entre  $1.53 \leq h \leq 1.833$  metros para el tramo 1, y entre  $0.732 \leq h \leq 0.765$  metros para el tramo 4.

6. Desde el punto de vista hidráulico sí se puede ampliar el rango de caudales  $960\text{l/s} \leq Q \leq 1248\text{l/s}$  considerado en el diseño de los floculadores de **la planta de tratamiento de agua potable “Lo De Coy”**. Sin afectar significativamente desde el mismo punto de vista, el proceso de floculación. Siendo este rango de  $600\text{l/s} \leq Q \leq 1640\text{l/s}$ . que de hecho actualmente son caudales de operación eventuales. Según información de los operadores de la planta.

- Para el caso del límite superior  $Q=1640\text{l/s}$  que interesa para una posible optimización, los gradientes están entre  $52.22 \leq G \leq 100.20$  por cada unidad de floculación y el tiempo de retención es 14.62 min. por cada unidad de floculación dichos rangos son aceptables según el diseño,  $10 \leq G \leq 100$  y  $15 \leq t \leq 30$ .
- Para el límite inferior  $Q=600\text{l/s}$  que puede darse en época seca por descenso de los caudales de agua superficial o en época lluviosa por problemas de calidad de agua. Los gradientes varían entre  $9.55 \leq G \leq 50.44$  por cada de floculador y el tiempo de retención es 36.33min. por cada floculador. En este caso los valores están fuera del rango tomado en cuenta en el diseño ( $30 \leq G \leq 100$  y  $15 \leq t \leq 30$ ). Sin embargo si se puede operar adecuadamente con este caudal por la flexibilidad de la planta para reducir unidades de operación. Ver recomendaciones para este caso.



7. En los floculadores de **la planta de tratamiento de agua potable “Lo De Coy”**, predomina el flujo de Pistón (94% y 95%). Dada esta condición, los tiempos reales  $tr$  son aproximadamente iguales a los tiempos teóricos  $to$ , para el rango de caudales analizados.
- Del análisis realizado el tiempo teórico correspondiente al caudal medio de diseño  $Q=960l/s$  es de  $to=25.30min/unidad$  de floculación, y el tiempo real de retención es de  $tr=26.75min/unidad$  de floculación.
  - El tiempo teórico de retención  $to$  para el caudal máximo de diseño  $Q=1248l/s$  es de  $to=20.21min/unidad$  de floculación y el tiempo real de retención  $tr=21.01min/unidad$  de floculación.
8. Para el intervalo de caudales de  $600l/s \leq Q \leq 1640l/s$  no existe presencia de zonas muertas y cortocircuitos apreciables, que podrían afectar el proceso de floculación en la planta. Esto también consecuencia del predominio de flujo de Pistón.
9. Como se indicó anteriormente el índice de Morril es una relación entre el tiempo en que sale el 90% y 10% del trazador. Si todo el flujo fuera de pistón, el índice de Morril sería 1, pues todo el trazador saldría en el tiempo  $tr=to$  y nada saldría antes o después. De esta manera se puede apreciar que para los caudales  $Q=960l/s$  y  $Q=1248l/s$  los índices de Morril son de 1.23 y 1.32 respectivamente, estos valores indican que el tiempo real de retención es aproximadamente igual al tiempo teórico de retención, al mismo tiempo se refirma que existe predominio de flujo de pistón.

10. Después de la mezcla rápida realizada en el parshall principal de la planta, existe una válvula de mariposa, la que sirve para graduar el caudal de entrada a cada floculador, además este caudal de entrada se mide por un parshall secundario. Durante los ensayos se pudo notar que estas dos instalaciones producen altos gradientes, afectando el desarrollo de gradientes en cada unidad. Esta situación produce un maltrato en el flóculo que se está formando a partir de la mezcla rápida.
  
11. De acuerdo con los gradientes presentados en Tabla XXXVI, los gradientes de máximo valor se dan en el tramo 1, estos gradientes aunque aceptables, varían drásticamente con los que se presentan en los otros tres tramos de cada floculador, situación que evidencia la conclusión del numeral anterior.
  
12. Las condiciones hidráulicas en las unidades de floculación son afectadas por la variación de niveles de agua de los sedimentadores, esta variación de niveles es causada por el cierre parcial o total de compuertas y válvulas que se encuentran a la entrada y salida de los mismos, este tipo de operaciones producen una pérdida de carga extra, la que afecta todos los parámetros que intervienen en el proceso de floculación ( $t$ ,  $G$ ,  $\nabla$ ,  $hf$  y de calidad de agua).

## RECOMENDACIONES

1. Se determina que es posible ampliar el rango de caudales a tratar en la planta sin afectar el proceso de floculación. Sin embargo es necesario evaluar todos los procesos restantes de la planta, para determinar si los mismos son afectados significativamente o no. Si los procesos no son afectados, operar la planta por largos periodos de tiempo, con caudales fuera del rango de diseño.
2. En la operación normal de la planta es decir utilizando tres floculadores, se aconseja operar con caudales de  $960 \leq Q \leq 1640$ .
3. Para operación de emergencia es decir utilizando menos de tres unidades, es necesario que el caudal de operación sea entre  $300 \leq Q < 547$  en cada floculador.
4. Con los parámetros hidráulicos obtenidos en el presente trabajo de graduación se puede obtener en el laboratorio las dosis óptimas de Sulfato de aluminio que es el coagulante que se utiliza actualmente en la planta Lo De Coy.

5. Todas las compuertas que comunican floculadores con sedimentadores deben mantenerse totalmente abiertas igualmente las compuertas a la salida de los sedimentadores a fin de permitir el flujo libre del agua para evitar pérdidas de carga perjudiciales al proceso de floculación, como espacios muertos aumento del tiempo de retención en las unidades variación de los gradientes de velocidad y otros.
  
6. Para anular la influencia que los parshall secundarios y su válvula de ingreso están causando en el proceso de floculación se deben evaluar las siguientes alternativas:
  - Disipar la energía en los parshall
  - Dosificar el coagulante en el resalto hidráulico que producen los parshall secundarios.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Cordón y Mérida ingenieros. **Manual de operaciones de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy.** s.i. Guatemala: s.e. 1978. 250pp.
2. De León Acuña, Fulvia. Aplicación de la prueba de jarras para la optimización de la dosis de sulfato de aluminio y los parámetros de floculación en el tratamiento de agua. Tesis Ing. Químico Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1985. 133pp.
3. Escoto Rosales Julio Rodolfo. Análisis del flujo y periodo de retención del proceso de floculación de la planta de tratamiento de agua potable, La Brigada, Ciudad de Guatemala. Tesis Ing. Civil Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1989. 80pp.
4. Pérez Carrión, José y Lidia Canepa de Vargas. **Manual II Criterios de selección curso de diseño de plantas de tratamiento de agua potable.** Centro Panamericano De Ingeniería Sanitaria Y Ciencias Del Ambiente (CEPIS), Organización Mundial De La Salud OMS, Organización Panamericana De La Salud OPS, s.l.: CEPIS, OMS, OPS, 1992 76pp.
5. Pérez Carrión, José y Lidia Canepa de Vargas. **Manual IV de evaluación de procesos de tecnología convencional tomo I planificación.** Centro Panamericano De Ingeniería Sanitaria Y Ciencias Del Ambiente (CEPIS), Organización Mundial De La Salud OMS, Organización Panamericana De La Salud OPS, s.l.: Editorial del CEPIS, OMS, OPS, 1992. 31pp.

6. Pérez Carrión, José y otros. **Manual IV de evaluación de procesos de tecnología convencional tomo II análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención.** Centro Panamericano De Ingeniería Sanitaria Y Ciencias Del Ambiente (CEPIS), Organización Mundial De La Salud OMS, Organización Panamericana De La Salud OPS, s.l.: Editorial del CEPIS, OMS, OPS, 1992. 64pp.
  
7. Pérez Carrión, José y Lidia Canepa de Vargas. **Manual IV de evaluación de procesos de tecnología convencional tomo III procesos-tecnología convencional.** Centro Panamericano De Ingeniería Sanitaria Y Ciencias Del Ambiente (CEPIS), Organización Mundial De La Salud OMS, Organización Panamericana De La Salud OPS, s.l.: Editorial del CEPIS, OMS, OPS, 1992. 117pp.
  
8. Rivera Juárez, Alfredo Jehovany. Evaluación del proceso de filtración de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy. Tesis Ing. Civil Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1996. 120pp.

## **APÉNDICE A**

**Gradientes de velocidad ( $G$ ) y tiempos de retención ( $tr$ ) del proceso de floculación de la planta “Lo De Coy**

## **APÉNDICE B**

**Criterios para diseño de floculadores hidráulicos de flujo horizontal**

## **ANEXO 1**

**Teoría de la coagulación-floculación**





## ÁPENDICE A.

### Gradientes de velocidad ( $G$ ) y tiempos de retención ( $tr$ ) del proceso de floculación de la planta “Lo De Coy”

En esta sección del trabajo se presentan los gradientes velocidad y tiempos de retención reales, los que fueron obtenidos luego utilizar modelos estadísticos de regresión utilizando mínimos cuadrados para determinar una tendencia, y ayudado con una hoja de cálculo, se genero la Tabla XXXVIII en el que se presentan datos como: caudal, tiempo de retención real ( $tr$ ), y gradientes de velocidad ( $G$ ).

**Tabla XXXVIII. Caudales, tiempos reales ( $tr$ ), y gradientes de velocidad  $G$**

Caudal (l/s)	Tramo 1 $G(s^{-1})$	Tramo 2 $G(s^{-1})$	Tramo 3 $G(s^{-1})$	Tramo 4 $G(s^{-1})$	$t_{r1}$ min	$t_{r2}$ min	$t_{r3}$ min	$t_{r4}$ min	$tr$ (min)
200.00	50.44	25.45	10.92	9.55	7.98	9.30	9.48	9.57	36.33
210.00	51.44	26.23	11.88	10.36	7.86	9.04	9.20	9.28	35.37
220.00	52.45	27.03	12.87	11.20	7.74	8.78	8.93	9.00	34.45
230.00	53.48	27.86	13.90	12.07	7.62	8.54	8.67	8.73	33.56
240.00	54.54	28.72	14.96	12.97	7.50	8.30	8.42	8.48	32.70
250.00	55.61	29.60	16.05	13.89	7.38	8.08	8.19	8.23	31.88
260.00	56.71	30.51	17.17	14.84	7.26	7.87	7.96	8.00	31.08
270.00	57.83	31.44	18.32	15.81	7.13	7.66	7.74	7.77	30.31
280.00	58.97	32.41	19.51	16.81	7.01	7.46	7.53	7.56	29.56
290.00	60.13	33.40	20.72	17.83	6.89	7.27	7.33	7.35	28.83
300.00	61.31	34.42	21.97	18.87	6.77	7.08	7.13	7.14	28.13
310.00	62.52	35.48	23.25	19.94	6.65	6.90	6.94	6.95	27.44
320.00	63.76	36.57	24.56	21.04	6.53	6.73	6.76	6.76	26.77

## CONTINUACIÓN

Caudal (l/s)	Tramo 1 $G(s^{-1})$	Tramo 2 $G(s^{-1})$	Tramo 3 $G(s^{-1})$	Tramo 4 $G(s^{-1})$	$t_{r1}$ min	$t_{r2}$ min	$t_{r3}$ min	$t_{r4}$ min	$tr$ (min)
330.00	65.01	37.69	25.89	22.15	6.41	6.56	6.58	6.57	26.12
340.00	66.29	38.84	27.26	23.29	6.29	6.39	6.41	6.39	25.49
350.00	67.60	40.04	28.66	24.46	6.17	6.24	6.24	6.22	24.87
360.00	68.93	41.26	30.08	25.64	6.05	6.08	6.08	6.05	24.26
370.00	70.29	42.53	31.54	26.85	5.93	5.93	5.92	5.89	23.66
380.00	71.68	43.83	33.02	28.08	5.81	5.78	5.76	5.73	23.08
390.00	73.09	45.18	34.53	29.34	5.68	5.64	5.61	5.57	22.51
400.00	74.53	46.56	36.07	30.61	5.56	5.50	5.47	5.42	21.96
410.00	76.00	47.99	37.64	31.91	5.44	5.37	5.32	5.27	21.41
420.00	77.50	49.46	39.24	33.23	5.32	5.24	5.18	5.13	20.87
430.00	79.02	50.98	40.86	34.57	5.20	5.11	5.05	4.99	20.35
440.00	80.58	52.54	42.52	35.93	5.08	4.98	4.92	4.85	19.83
450.00	82.17	54.15	44.19	37.31	4.96	4.86	4.79	4.72	19.32
460.00	83.79	55.81	45.90	38.72	4.84	4.74	4.66	4.59	18.82
470.00	85.44	57.53	47.63	40.14	4.72	4.62	4.53	4.46	18.33
480.00	87.13	59.29	49.39	41.59	4.60	4.50	4.41	4.33	17.84
490.00	88.84	61.11	51.18	43.06	4.48	4.39	4.29	4.21	17.37
500.00	90.59	62.98	53.00	44.54	4.36	4.28	4.18	4.09	16.90
510.00	92.38	64.91	54.84	46.05	4.24	4.17	4.06	3.97	16.44
520.00	94.20	66.90	56.70	47.58	4.11	4.07	3.95	3.85	15.98
530.00	96.06	68.96	58.59	49.13	3.99	3.96	3.84	3.74	15.53
540.00	97.95	71.07	60.51	50.70	3.87	3.86	3.73	3.63	15.09
546.67	99.23	72.52	61.81	51.75	3.79	3.79	3.66	3.55	14.80
550.00	99.88	73.25	62.46	52.28	3.75	3.76	3.62	3.52	14.65

Con este cuadro se pueden utilizar los valores para realizar pruebas de jarras que determinaran rangos óptimos en el tratamiento de agua del proceso de floculación.

## ÁPENDICE B.

### Criterios para diseño de floculadores hidráulicos de flujo horizontal

En este apéndice se presenta información básica de criterios usados comúnmente en el diseño de unidades de floculación (ver Tablas XXXIX y XL).

**Tabla XXXIX. Tiempo de retención  $t$**

Recomendado por	Tiempo de retención (min)
Hopkins, 1948	$15 \leq t \leq 30$
Fair Geyer y Okun 1968	$10 \leq t \leq 60$
Babbitt and Donald	$30 \leq t \leq 60$
Cordón y Mérida (Criterios Utilizados En El Diseño De La Planta)	$15 \leq t \leq 30$
CEPIS, OPS Y OMS	$10 \leq t \leq 30$

**Tabla XL. Gradientes de velocidad  $G$**

Recomendado por	Gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ )
Fair Geyer y Okun	$20 \leq G \leq 75$
Richter 1981	$10 \leq G \leq 70$
Arboleda 1975	$10 \leq G \leq 100$
Cordón y Mérida (Criterios Utilizados En El Diseño De La Planta)	$10 \leq G \leq 100$
CEPIS, OPS Y OMS	$20 \leq G \leq 70$

## **ANEXO 1.**

### **Teoría de la coagulación-floculación**

#### **1.1. Estado coloidal**

##### **1.1.1. Coloide**

Las partículas coloidales son todas aquellas cuyo tamaño oscila entre 1 y 1000 milimicrones ( $m\mu$ ); es decir están entre las partículas en solución verdaderas y las suspendidas. El término coloide significa gelatinoso y fue aplicado originalmente por Graham a las dispersiones de proteínas, al comprobar que su comportamiento no era igual al de las verdaderas soluciones.

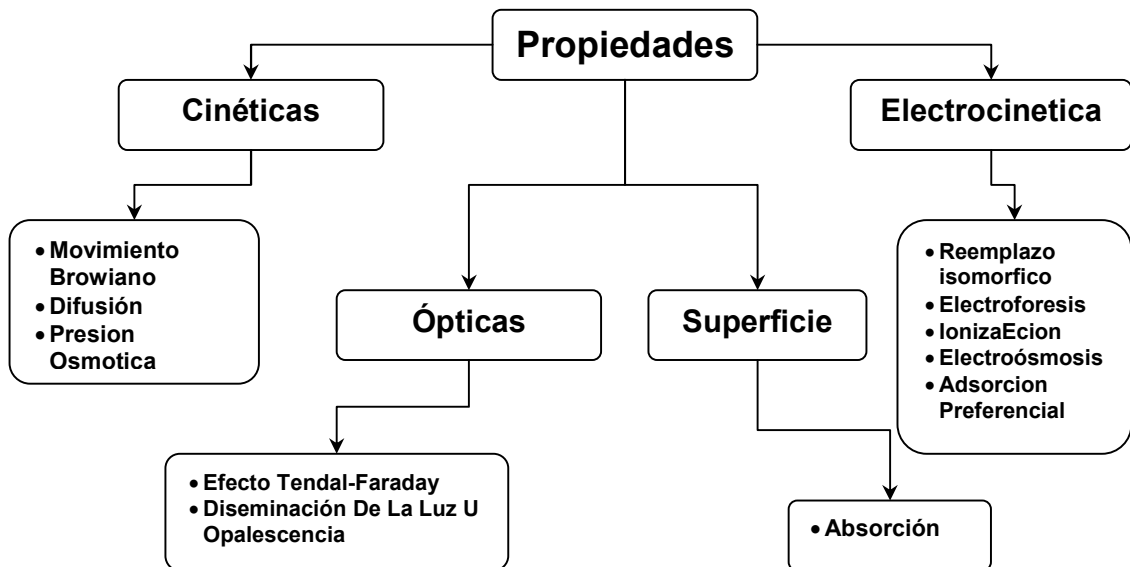
En la actualidad, los coloides representan un estado de la materia en el que las partículas de las sustancias tienen cierto tamaño, que esta entre el de las moléculas pequeñas, los átomos y los iones por un lado y la materia organizada por el otro.

Entre los sistemas coloidales mas conocidos se mencionan:

- Aerosoles
- Soles
- Geles
- Emulsiones

## 1.2. Propiedades de los coloides

Figura 33. Propiedades de los coloides



## 1.3. Mecanismos de desestabilización de los coloides

### 1.3.1. Coagulación floculación

#### 1.3.1.1. Concepto

La coagulación floculación de la turbiedad del agua constituye el proceso básico que determina en gran parte las condiciones de operación de la planta de tratamiento. De aquella depende casi por completo la mayor o menor eficacia del proceso subsiguiente: el de la separación de sólidos por sedimentación y filtración. La remoción de turbiedad en los sedimentadores y en ellos, se relaciona directamente con la manera como las partículas sean desestabilizadas y con la intensidad de las fuerzas que las aglutinan.

Por tanto para desestabilizar las suspensiones caben dos posibilidades:

- Reducir las fuerzas repulsivas o aumentar las fuerzas atractivas
- Superar las fuerzas repulsivas mediante la creación de enlace

En el contexto tecnológico hay que distinguir dos aspectos fundamentales en la coagulación floculación de la turbiedad del agua:

- La desestabilización de las partículas suspendidas, o sea la remoción de las fuerzas que las mantiene separadas (coagulación)
- El transporte de ellas dentro del líquido para que hagan contacto, generalmente estableciendo puentes entre si y colmando una malla tridimensional de coagulación porosos (floculación)

El proceso de coagulación floculación tiene como objetivos los siguientes:

- Remoción de turbiedad orgánica o inorgánica que no puede sedimentare rápidamente
- Remoción de color verdadero y aparente
- Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados químicos suspendidos en otros

Para realizar este proceso en las plantas de tratamiento son necesarios 3 pasos separados:

- Adición de los coagulantes
- Dispersión de los coagulantes (mezcla rápida)
- Aglutinación de partículas (mezcla lenta)

Esto significa que después de agregar y dispersar los coagulantes hay que producir una lenta agitación en el agua para permitir el crecimiento del floculo. Este crecimiento es inducido por el contacto entre partículas de diámetro mayor de  $1\mu$  creado por el gradiente de velocidad de masa líquida (las partículas menores de  $1\mu$  están influenciadas más por el movimiento browniano que por el gradiente de velocidad).

Por ello toda floculación debe estudiarse 3 características:

- La forma de producir agitación
- El gradiente de velocidad
- El tiempo de detención

Los dos objetivos básicos que persiguen son:

1. Reunir microfloculos para formar partículas mayores con peso específico superior al del agua.
2. Compactar el floculo (disminuyendo su grado de hidratación) para producir una baja concentración volumétrica, que permita una alta eficiencia en la fase de separación (sedimentación-filtración).

Las variables que deben tomarse en cuenta en el proceso que aquí interesa son:

- Concentración del coagulante
- La intensidad de agitación ( $G$ ) (expresada como gradiente de velocidad  $s^{-1}$ )
- El tiempo de retención
- El número de compartimientos del floculador

#### **1.4. Fases de la coagulación**

Cuando se dice que una suspensión ha alcanzado el punto izoeléctrico, lo que se quiere decir es que el promedio de la carga de las partículas es cero o tiende a cero; pero no debe olvidarse que cierta proporción tiene carga positiva o negativa, lo que complica la interpretación del fenómeno.

Sin embargo, conviene distinguir:

- Los coloides que existen en la suspensión y se quieren desestabilizar
- Los coloides que se forman al agregar los coagulantes

Teniendo en cuenta esta distinción podía considerarse la coagulación desarrollándose en cinco fases consecutivas y simultáneamente que implicarían reacciones químicas y físicas así:

- 1ª FASE: Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas existentes en la suspensión.
- 2ª FASE: Precipitación y formación de compuestos químicos que se polimerizan.
- 3ª FASE: absorción de las cadenas poliméricas en la superficie de los coloides.
- 4ª FASE: Adsorción mutua entre coloides.
- 5ª FASE: Acción de barrido.

#### **1.5. Control del proceso de coagulación-floculación**

En general los métodos podrían dividirse en cuatro grupos:

- Sistemas de simulación del proceso de coagulación (prueba de jarras)
- Sistema de medida de las cargas electrostática (potencial zeta).
- Sistema de medida de la filtrabilidad del agua.

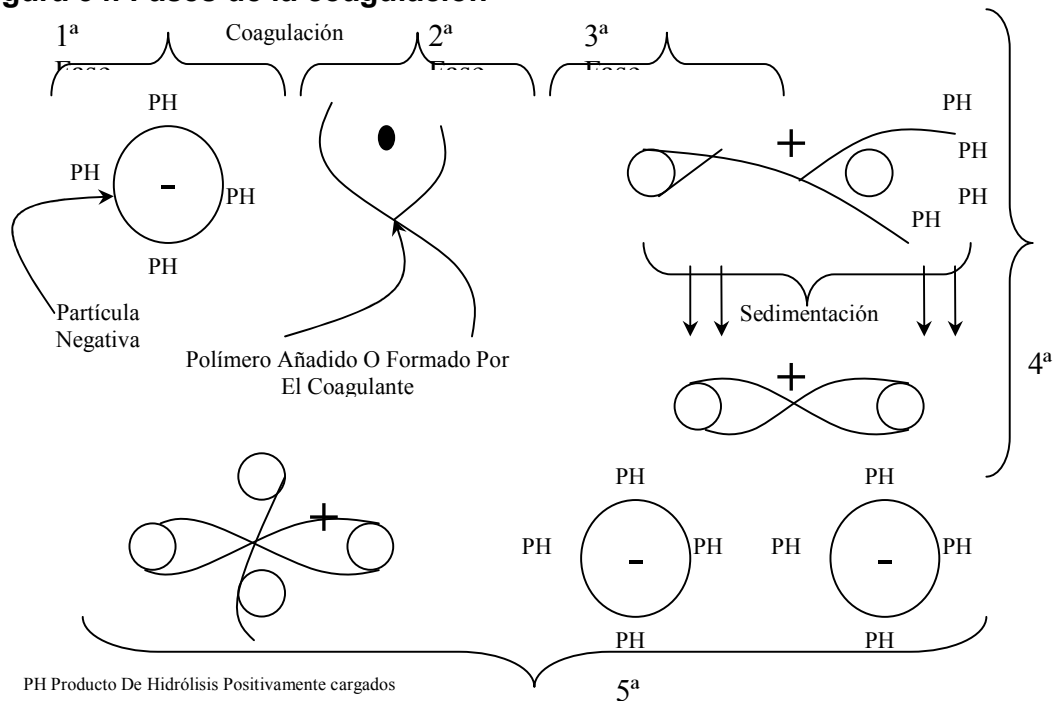


– Sistema de conteo del número de partículas (contador de partículas).

El control de los aspectos físico-químico no es suficiente en la práctica diaria de operación de plantas. Es importante también analizar las características hidráulicas de las unidades para poder determinar el tiempo real que el agua queda retenida en los tanques y la extensión y gravedad de los cortos circuitos. Los aspectos anteriores inciden en la cantidad de coagulante que se use, lo cual tiene gran importancia en la eficiencia así como el rendimiento del mismo.

En la figura 34 se presentan un esquema que ilustra las fases de la coagulación.

**Figura 34. Fases de la coagulación**



De los sistemas mencionados el más utilizado es el primero, “simulación del proceso de coagulación” (prueba de jarras).

## **1.6. Factores que influyen en la coagulación**

### **1.6.1. Influencia del potencial de hidrogeno**

El potencial de hidrogeno (pH) es un factor muy importante para la coagulación. En general el potencial de hidrogeno (pH) optimo para la coagulación de aguas con color esta en el rango de 4-6 mientras que para aguas con turbiedad entre 6.5 y 8.5 es decir que se requiere un potencial de hidrogeno (pH) mas bajo para aguas coloreadas que con solo turbiedad. Generalmente las sales férricas son más efectivas en rangos de pH amplios que las sales de aluminio.

### **1.6.2. Dosis óptima de coagulación**

En general la dosis química requerida depende del mecanismo de desestabilización. Cuando la desestabilización se realiza por absorción la dosis es menor que cuando es por otro mecanismo pero aumenta con al concentración de coloides.

Cuando la coagulación se realiza por absorción del coagulante, este es adsorbido sobre la superficie del sólido hasta que dicha superficie esta cubierta completamente. Cuando ya no es posible una mayor absorción de coagulante, se considera haber suministrado la dosis óptima. Esto es mientras no se rompa alguna macromolécula (floculo o coloide) que deje al descubierto una superficie libre al coagulante, porque entonces consumirá mas: De ahí que la dosis oprima de floculante sea directamente proporcional a la superficie especifica del sólido, es decir al tamaño y forma de los granos.

Además del mecanismo por el cual se realiza la coagulación es importante analizar lo siguiente:

- Influencia del tipo de partículas en la cantidad de coagulante
- Relación turbiedad versus cantidad de coagulante consumido

Influencia de la cantidad de coagulante en el potencial de hidrogeno (pH) del agua y la turbiedad residual.

Las sustancias químicas o reactivos utilizados en la coagulación especial cuando se tratan aguas de alta turbiedad son mas costosas que otras sustancias (cloro, cal fluoruros y otros), que se emplean en el tratamiento del agua tomadas conjuntamente, por esta razón una reducción de un 10 a un 20% en el uso de coagulantes es representativo en la economía.

Se afirma que para obtener una eficacia óptima de los reactivos, estos no deben usarse inmediatamente después de preparados sino que por el contrario, deben dejarse estabilizar cierto tiempo.

Para las aguas de baja turbiedad se aconseja utilizar otra técnica: adición de partículas de arcilla, por ejemplo bentonita, para aumentar la turbiedad antes de inyectar el coagulante, de esta manera se reduce la dosis necesaria ya que no se realiza el proceso por captura sino por absorción.

### **1.6.3. Gradiente de velocidad**

La variable más importante en la prueba de jarras es el gradiente de velocidad que expresa la intensidad de agitación. En el equipo de Prueba de Jarras se utilizan paletas o rotores accionados en forma mecánica o magnética.

Al utilizar únicamente paletas es necesario elevar la velocidad por encima de la que normalmente opera los equipos, produciéndose, al detenerse el motor, por inercia, un movimiento helicoidal que producirá resultados erróneos en el ensayo de sedimentación, por lo tanto es necesario recurrir al uso de deflectores fijos de tipo continuo o discontinuo.

### **1.7. Mecanismos de coagulación floculación**

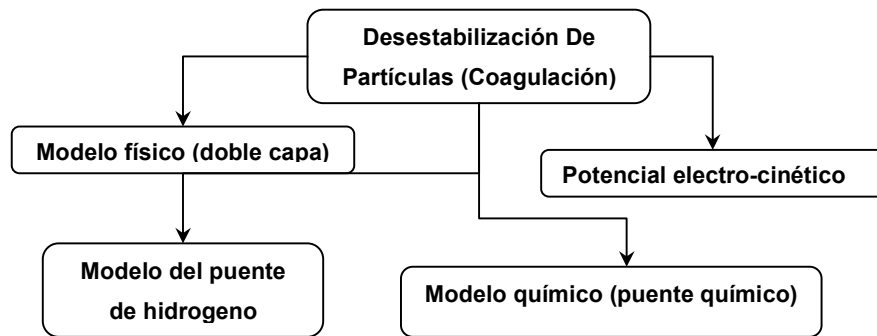
Cuatro modelos explican la coagulación: el de la doble capa, basado en las fuerzas electrostáticas de atracción o el del puente químico que establece una relación de dependencia entre las fuerzas químicas y la superficie de los coloides. El modelo de reducción del potencial electro-cinético y el modelo del puente de hidrogeno.

En la floculación debe distinguirse entre: floculación ortocinética y percinética.

La primera es inducida por la energía comunicada al liquido por fuerzas externas (paletas giratorias por ejemplo), la segunda es promovida, internamente en el liquido, por el movimiento de agitación que las partículas tienen dentro de aquel (movimiento Browniano) y por la gravedad o peso de las partículas que al caer tienden a aglomerarse y se realiza en un tiempo muy corto, después de desestabilizada la partícula.

En la figura 35 se presenta la desestabilización de las partículas lo que común mente se llama coagulación. En la figura 36 se presenta el transporte de partículas lo que se llama floculación.

**Figura 35. Desestabilización de partículas (coagulación)**



**Figura 36. Transporte de particular (floculación)**

