



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSOS DEL AGUA**

**EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA  
INTEGRADO DE POTABILIZACIÓN PARA  
COMUNIDADES RURALES**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTORA EN  
INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN CIENCIAS DEL AGUA**

**P R E S E N T A**

**M. EN I. A. THELMA BEATRIZ PAVÓN SILVA**

**DIRECTOR DE TESIS**

**DRA. SOFIA ESPERANZA GARRIDO HOYOS. CIRA-UAEM**

**CODIRECTOR**

**DR. PEDRO MARTÍNEZ PEREDA. DEPMI-UNAM**

**TOLUCA, MÉXICO**

**AGOSTO 2003**

## ÍNDICE

<b>Lista de tablas</b> _____	<b>vi</b>
<b>Lista de figuras</b> _____	<b>vii</b>
<b>Lista de planos</b> _____	<b>x</b>
<b>Símbolos</b> _____	<b>xi</b>
<b>Divulgación de los resultados de la tesis</b> _____	<b>xiv</b>
<b>Resumen</b> _____	<b>xvii</b>
<b>Abstract</b> _____	<b>xviii</b>
<b>Capítulo 1. Antecedentes</b> _____	<b>1</b>
1.1. Problemática _____	1
1.2. Cantidad de agua disponible en México _____	1
1.3. Abastecimiento de agua potable y saneamiento _____	4
1.3.1. Situación actual _____	4
1.4. Fuentes de abastecimiento de agua _____	5
1.5. Conceptos generales de las operaciones unitarias utilizadas en la potabilización de agua _____	5
1.5.1. Coagulación-floculación _____	6
1.5.2. Sedimentación (proceso de clarificación) _____	9
1.5.3. Filtración _____	11
1.5.4. Desinfección _____	14
1.6. Sedimentación con manto de lodo _____	16
1.6.1. Carga superficial del manto de lodo _____	20
1.6.2. Clasificación de los sedimentadores con manto de lodo _____	21
1.6.3. Aspectos químicos de la sedimentación _____	29
1.6.4. Aspectos hidráulicos de la sedimentación _____	29
1.6.5. Investigaciones relacionadas con sedimentación con manto de lodo _____	33
1.7. Ubicación y descripción de la planta potabilizadora piloto (PPP) _____	39
1.7.1. Historia de la PPP _____	39

1.7.2.	Descripción y dimensiones de la PPP _____	40
1.7.3.	Mantenimiento de la PPP _____	43
1.8.	Justificación del trabajo _____	44
<b>Capítulo 2. Hipótesis, objetivos y alcances _____</b>		<b>53</b>
2.1	Hipótesis _____	53
2.2	Objetivos _____	53
2.3	Alcances _____	54
<b>Capítulo 3. Metodología _____</b>		<b>55</b>
3.1.	Procedimiento experimental I (pruebas en el laboratorio) _____	57
3.1.1.	Descripción y caracterización de los diferentes tipos de agua empleados en la experimentación _____	57
3.1.2.	Obtención de los parámetros que afectan las operaciones unitarias de coagulación floculación sedimentación (prueba de jarras) _____	58
3.1.2.1.	Determinación de la dosis óptima de coagulante _____	58
3.1.2.2.	Medición del tamaño de flóculo formado _____	59
3.1.2.3.	Determinación del pH óptimo de coagulación floculación _____	60
3.1.2.4.	Determinación del ayudante de coagulación floculación _____	60
3.1.3.	Caracterización del medio filtrante _____	61
3.1.3.1.	Granulometría de la arena sílica del medio filtrante _____	61
3.1.3.2.	Peso específico de la arena sílica del medio filtrante _____	61
3.2.	Determinación de los parámetros teóricos de diseño y operación _____	62
3.2.1.	Comportamiento de la velocidad de flujo con respecto a la zona de cambio de área del sistema _____	62
3.2.2.	Cálculo de los parámetros de diseño de cada operación unitaria de la planta _____	62

3.3. Procedimiento experimental II (pruebas en la planta potabilizadora piloto PPP) _____	65
3.3.1. Evaluación del caudal a través de la altura del chorro ascendente _____	65
3.3.2. Comportamiento hidráulico de la PPP _____	67
3.3.2.1. Análisis de flujos y factores que determinan el tiempo de retención en la PPP _____	67
3.3.2.2. Determinación de las pérdidas de carga en la PPP _____	69
3.3.3. Operación de la PPP _____	70
3.3.3.1. Evaluación de las características de los flóculos que forman el manto de lodo _____	71
3.3.4. Pruebas de filtración en la PPP _____	76
3.3.4.1. Evaluación de la tasa de filtración _____	76
3.3.4.2. Expansión del lecho filtrante _____	77
3.3.4.3. Lavado del lecho filtrante _____	77
3.3.5. Metodología de las pruebas en la PPP para diferentes tipos de agua _____	78
3.3.6. Tren de tratamiento para los diferentes tipos de agua a tratar _____	81
<b>Capítulo 4. Resultados y discusión _____</b>	<b>82</b>
4.1. Procedimiento experimental I (pruebas en el laboratorio). _____	82
4.1.1. Caracterización de los diferentes tipos de agua empleados en la experimentación _____	82
4.1.2. Obtención de los parámetros que afectan las operaciones unitarias de coagulación-floculación-sedimentación (prueba de jarras) _____	83
4.1.2.1. Determinación de la dosis óptima de coagulante y medición del tamaño de flóculo formado _____	83
4.1.2.2. Determinación de pH óptimo de coagulación-floculación _____	89

4.1.2.3. Determinación del ayudante de coagulación-floculación _____	92
4.1.2.4. Caracterización del medio filtrante _____	98
4.1.2.4.1. Granulometría de la arena sílica del medio filtrante _____	98
4.1.2.4.2. Peso específico de la arena sílica del medio filtrante _____	99
4.2. Cálculo de los parámetros teóricos de diseño y operación _____	100
4.2.1. Comportamiento de la velocidad de flujo con respecto a la zona de cambio de área del sistema _____	100
4.2.2. Cálculo de los parámetros de diseño de cada operación unitaria de la planta _____	101
4.3. Procedimiento experimental II. (pruebas en la planta potabilizadora piloto PPP) _____	104
4.3.1. Evaluación del caudal a través de la altura del chorro ascendente (altura de la fuente) _____	104
4.3.2. Comportamiento hidráulico de la PPP _____	106
4.3.2.1. Análisis de flujos y factores que determinan el tiempo de retención en la PPP _____	106
4.3.2.2. Determinación de las pérdidas de carga en la PPP ____	109
4.3.3. Operación de la PPP _____	110
4.3.3.1. Resultados de las pruebas en planta para agua tipo 1 ____	110
4.3.3.2. Resultados de las pruebas en planta para agua tipo 2 ____	113
4.3.3.2.1. Evaluación de las características de los flocúlos que forman el manto de lodo _____	125
4.3.3.3. Resultados de las pruebas en planta para agua tipo 3 ____	128
4.3.4. Estudio de la formación del manto de lodo con el agua tipo 3 ____	138
4.3.5. Resultados de las pruebas de filtración en la PPP _____	144
4.3.5.1. Evaluación de la tasa de filtración en la PPP _____	144
4.3.5.2. Expansión del lecho filtrante en la PPP _____	144
4.3.5.3. Lavado del lecho filtrante _____	144

4.3.6. Tren de tratamiento para diferentes tipos de agua a tratar _____	145
<b>Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones _____</b>	<b>147</b>
<b>Capítulo 6 Bibliografía _____</b>	<b>151</b>
<b>Anexos _____</b>	<b>161</b>
<b>Anexo I:</b> Norma 127-SSA1-1994 valores máximos permisibles para agua destinada a uso y consumo humano _____	161
<b>Anexo II:</b> Memoria de cálculo del diseño de la PPP _____	163
<b>Anexo III:</b> Propuesta de manual de operación y control de la PPP _____	168
<b>Anexo IV:</b> Tablas de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados _____	188
<b>Anexo V:</b> Resultados de los análisis y flujos que determinan el tiempo de retención en la PPP _____	197

## Lista de tablas

### Capítulo 1.

Tabla 1.1. Distribución de la población por tamaño de localidad _____	4
Tabla 1.2. Clasificación de sedimentación _____	9
Tabla 1.3. Características del medio filtrante _____	14
Tabla 1.4. Parámetros operacionales para unidades con manto de lodo _____	21
Tabla 1.5. Características de sedimentadores con manto de lodo _____	23

### Capítulo 3.

Tabla 3.1. Condiciones de mezclado para las pruebas de jarras con base en las dimensiones de la planta piloto _____	58
Tabla 3.2. Valores del índice de Willcomb _____	59
Tabla 3.3. Factor $\phi$ para determinar el caudal con base en la altura de la fuente _____	66
Tabla 3.4. Distribución de los puntos de inyección y cuantificación del trazador en la planta piloto para las pruebas de inyección de pulso _	68
Tabla 3.5. Descripción de los diferentes puntos de muestreo _____	71

### Capítulo 4.

Tabla 4.1. Caracterización de los tipos de aguas estudiadas _____	83
Tabla 4.2. Turbiedad residual para las condiciones de mezclado de la planta considerando agua tipo 2 _____	85
Tabla 4.3. Turbiedad residual utilizando povimal® para agua tipo 2 _____	86
Tabla 4.4. Turbiedad residual en prueba de jarras en condiciones de mezclado de la planta adicionando ayudante de coagulación para agua tipo 2 _____	93
Tabla 4.5. Dosis de ayudante de floculación para la figura 4.6. _____	95
Tabla 4.6. Dosis de ayudante de floculación para la figura 4.7. _____	96
Tabla 4.7. Análisis granulométrico de arena sílica _____	98
Tabla 4.8. Parámetros teóricos calculados para secciones sin cambio de área	102
Tabla 4.9. Parámetros teóricos calculados para secciones de cambio de área _	104

Tabla 4.10. Tiempo de retención obtenido en prueba instantánea con trazador _	107
Tabla 4.11a. Evaluación de las pruebas en planta para el agua tipo 1 _____	111
Tabla 4.11b. Evaluación de las pruebas en planta para el agua tipo 1 _____	112
Tabla 4.12. Análisis de microorganismos patógenos en prueba en planta con agua tipo 1 _____	112
Tabla 4.13. Prueba 1 con povimal® _____	114
Tabla 4.14. Prueba 2 con povimal® _____	115
Tabla 4.15. Prueba 3 con povimal® _____	117
Tabla 4.16. Prueba 4 con povimal® _____	119
Tabla 4.17. Resultados de pruebas con lodos _____	126
Tabla 4.18. Caracterización del agua tratada en planta piloto aplicando sulfato de aluminio (povimal®) _____	134
Tabla 4.19. Calidad del agua tratada en planta piloto aplicando cloruro férrico _	135
Tabla 4.20. Calidad del agua tratada en planta piloto aplicando povimal® _____	136
Tabla 4.21. Porcentajes de remoción de algunos parámetros medidos de acuerdo al coagulante empleado _____	138

## Lista de figuras

### Capítulo 1.

Figura 1.1. Tren de tratamiento (diversas alternativas) de acuerdo a la calidad de agua de la fuente de abastecimiento _____	6
Figura 1.2. Mecanismos que se producen en el transporte de partículas en los granos del medio filtrante _____	12
Figura 1.3. Componentes de un sedimentador con manto de lodo _____	22
Figura 1.4. Sedimentadores con manto de lodo de suspensión hidráulica _____	25
Figura 1.5. Sedimentador de pulso en los dos tiempos del pulso _____	26
Figura 1.6. Unidades de sedimentación con manto de lodo de separación dinámica _____	28
Figura 1.7. Croquis de ubicación de la planta potabilizadora piloto _____	40

Figura 1.8. Fotografía de la planta potabilizadora piloto \_\_\_\_\_ 46

**Capítulo 3.**

Figura 3.1. Descripción de las actividades realizadas en el laboratorio \_\_\_\_\_ 55

Figura 3.2. Descripción de las actividades realizadas en la planta piloto \_\_\_\_\_ 56

Figura 3.3. Caudal dentro de una tubería de 50 mm de diámetro basada en la altura de la fuente formada \_\_\_\_\_ 66

Figura 3.4. Probeta y gráfico utilizado para determinar el coeficiente de cohesión de lodo \_\_\_\_\_ 74

**Capítulo 4.**

Figura 4.1. Dosis óptima de coagulantes en condiciones de mezclado de la planta para agua tipo 2 \_\_\_\_\_ 86

Figura 4.2. Determinación de la dosis óptima de coagulante para agua tipo 3 \_\_\_\_ 87

Figura 4.3. Determinación de la dosis óptima de coagulante para agua tipo 3 (cambio de escala) \_\_\_\_\_ 88

Figura 4.4. pH óptimo de coagulación en condiciones de mezclado de la planta para agua tipo 2 \_\_\_\_\_ 90

Figura 4.5. pH óptimo en condiciones de mezclado de la planta para agua tipo 3 \_\_\_\_\_ 91

Figura 4.6. Porcentaje de remoción en la turbiedad comparando ayudantes de floculación con cloruro férrico a 10 mg/L \_\_\_\_\_ 95

Figura 4.7. Porcentaje de remoción en la turbiedad comparando ayudantes de floculación para sulfato de aluminio a 10 mg/L \_\_\_\_\_ 97

Figura 4.8. Análisis granulométrico del medio filtrante (arena sílica) \_\_\_\_\_ 99

Figura 4.9. Variación de áreas en la zona de sedimentación de la planta piloto\_ 100

Figura 4.10. Variación de la velocidad en la zona de sedimentación de la PPP\_ 101

Figura 4.11. Relación del gasto de alimentación con la altura de la fuente (chorro ascendente) \_\_\_\_\_ 105

Figura 4.12. Caudal de la fuente con respecto al caudal alimentado \_\_\_\_\_ 106

Figura 4.13. Concentración del trazador en función del tiempo para la sección del manto de lodo con inyección de trazador de forma instantánea _____	108
Figura 4.14. Localización de la purga general _____	110
Figura 4.15. Comportamiento de las variables de proceso en planta con cloruro férrico para agua tipo 2 _____	121
Figura 4.16. Comportamiento de las variables de proceso en planta con povimal® _____	124
Figura 4.17. Comportamiento de las variables de proceso en planta con sulfato de aluminio para agua tipo 3 _____	130
Figura 4.18. Comportamiento de las variables de proceso en planta con cloruro férrico para agua tipo 3 _____	132
Figura 4.19. Comportamiento de las variables de proceso en planta con povimal® para agua tipo 3 _____	133
Figura 4.20. Turbiedad residual con respecto al tiempo en la zona de formación del manto de lodo ( $\text{FeCl}_3$ ) _____	139
Figura 4.21. Concentración de sólidos sedimentables en la zona de formación del manto de lodo ( $\text{FeCl}_3$ ) _____	140
Figura 4.22. Turbiedad residual con respecto al tiempo en la zona de formación del manto de lodo (povimal®) _____	141
Figura 4.23. Concentración de sólidos sedimentables en la zona de formación del manto de lodo (povimal®) _____	142
Figura 4.24. Turbiedad residual en los puntos de muestreo 14 y 15, salidas del clarificador y filtro respectivamente _____	143
Figura 4.25. Turbiedad residual en el retrolavado del filtro _____	145
Figura 4.26. Tren de tratamiento por tipo de agua _____	145

## **Lista de planos**

Plano A-01. Perspectiva y detalle de tubería de entrada y salida de agua _____	47
Plano A-02. Descripción general de la PPP _____	48
Plano A-03. Detalle de dispositivo de recirculación de lodo _____	49
Plano A-04. Unidad de desinfección _____	50
Plano A-05. Celda electrolítica _____	51
Plano A-06. Ubicación de los puntos de medición de pérdida de carga hidráulica y fotos que muestran la medición del trazador _____	52

**Símbolos.**

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>	<b>Unidades</b>
$a_m$	área menor	$m^2$
$a_M$	área mayor	$m^2$
$A$	área de sección transversal de tubería o sección	$m^2$
$A_p$	área de la partícula	$m^2$
$c$	concentración de sólidos en relación volumen.	mL de lodo/ mL de muestra
$C$	número de Camp	adimensional
$C_d$	coeficiente de arrastre	adimensional
$C_{ex}$	coeficiente para el cálculo de la pérdida de carga debida a la expansión progresiva del área de sección transversal	adimensional
$C_{min}$	punto de reducción en la parte final de una curva de sedimentación por compresión	adimensional
$C_{re}$	coeficiente para el cálculo de la pérdida de carga debida a la reducción progresiva del área de sección transversal	adimensional
$CU$	coeficiente de uniformidad de material del filtro	adimensional
$D$	diámetro de la tubería	m
$D/uL$	dispersión del trazador	adimensional
$D_{10}$	diámetro efectivo a tamaño 10%	%
$D_{60}$	diámetro efectivo a tamaño 60%	%
$D_e$	diámetro equivalente	m
$D_m$	diámetro de sección menor	m
$D_M$	diámetro de sección mayor	m
$D_{par}$	diámetro de la partícula	m
$DTR$	distribución de tiempo de residencia	-
$e/D$	rugosidad relativa,	adimensional
$f_D$	factor de fricción	adimensional
$g$	aceleración de la gravedad 9.81	$m/s^2$
$G$	gradiente de velocidad	$s^{-1}$
$h$	pérdida de carga	
$H_1, H_2$	altura de la interfase en el manto de lodo	m
$H_3- H_4$	diferencia de altura en la determinación de pérdida de carga	m
$h_f$	altura de la fuente	cm
$h_f$	altura de la fuente	m
$h_L$	pérdida de carga debida a la fricción	m
$h_{lodo}$	pérdida de carga debida a la presencia de sólidos	m
$K$	Indica la fuerza de unión entre las partículas del lodo	adimensional
$k_{cb}$	constante de corrección cambio paulatino si el cambio es súbito toma un valor $k_{cb} = 1$	adimensional
$k_{ex}$	constante de corrección por expansión	adimensional

$k_{re}$	constante de corrección por reducción	adimensional
L	longitud de la trayectoria	m
$L_v$	distancia entre vertederos	m
$M_{ad\ 4^{\circ}C}$	masa de agua destilada a 4°C	Kg
$M_{lodo}$	masa de lodo	Kg
$M_{Sól}$	masa de sólidos	Kg
$M_{Tot}$	masa total	Kg
n	factor exponencial	adimensional
$n_i$	número de observaciones en la medición de velocidad de sedimentación	numérico
$n_o/n_t$	relación de partículas a los tiempos t e inicial en el clarificador	adimensional
p	proporción del área libre no ocupada por las partículas	%
$P_e$	peso específico del medio filtrante	g/L
Q	caudal	m <sup>3</sup> /s
$Q_F$	caudal a la salida de la fuente	m <sup>3</sup> /s
$Q_R/Q$	tasa de recirculación	adimensional
Re	numero de Reynolds	adimensional
S	peso específico	g
$S_{se}$	sólidos sedimentables	mL/L
$S_{su}$	sólidos suspendidos	g/L
t	tiempo	min
$t_m$	tiempo promedio de residencia	min (s)
v	velocidad	m/s
V	volumen	m <sup>3</sup>
v	velocidad del flujo ascendente del agua	m/s
$V_0$	volumen aparente de lodo en expansión	m <sup>3</sup>
$V_d$	velocidad intersticial	m/s
$V_{Es}$	volumen en estudio	m <sup>3</sup>
$v_f$	velocidad de filtración	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d
$V_{lodo}$	volumen de lodo	m <sup>3</sup>
$V_{máx}$	velocidad de sedimentación en la parte inferior del manto de lodo	m/s
$V_p$	volumen de la partícula	m <sup>3</sup>
$v_s$	velocidad de sedimentación de la partícula	m/s
$V_{sed}$	volumen que ocupa la sección de sedimentación	m <sup>3</sup>
$V_{sedpro}$	velocidad de sedimentación promedio de la partícula	m/s
$X_{agua}$	fracción peso del agua	kgagua/kg agua+sólidos

$X_{sól}$	fracción peso sólido	kgsólido/kg Agua+sólidos
$\alpha$	ángulo de reducción o ensanchamiento	
$\mu_{agua}$	viscosidad del agua	kg/m·s
$\mu_{mez}$	viscosidad de la mezcla	kg/m·s
$\nu$	viscosidad cinemática	m <sup>2</sup> /s
$\rho_{agua}$	densidad del agua	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_l$	densidad del líquido	Kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{lodo}$	densidad del lodo	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{Mez}$	densidad de la mezcla agua + sólidos	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_p$	densidad de las partículas	Kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{sól}$	densidad del sólido	kg/m <sup>3</sup>
$\phi$	factor leído en gráfico, para determinar el gasto dado por la altura de la fuente	adimensional
$\gamma_{agua}$	peso específico del agua	kg/m <sup>2</sup> s <sup>2</sup>
$\gamma_{lodo}$	peso específico del lodo	kg/m <sup>2</sup> s <sup>2</sup>
$\gamma_{Mez}$	peso específico de la mezcla	kg/m <sup>2</sup> s <sup>2</sup>
$\mu_{lod}$	viscosidad del lodo	kg/m·s
$\pi$	constante = 3.1416	--
$\theta$	tiempo de residencia	s
$\theta_f$	tiempo de residencia del filtro	s

## **Divulgación de los resultados de la tesis**

### **Artículos en revistas con arbitraje**

Pavón Silva T., Chávez Guerra C. y Garrido Hoyos S. (2002). Evaluation of a Package Plant for Small Communities. IWA. Journal Water Science and Technology: Water Supply Vol 2. No. 4.

Pavón Silva T., Chávez Guerra C. Garrido Hoyos S y Martínez Pereda P. (2002). Evaluación de la sedimentación por manto de lodo en una planta piloto. Revista de ingeniería hidráulica en México. Enviado julio 2002.

### **Capítulos en libro**

Pavón Silva T. y Garrido Hoyos S. (2002). Agua y su Contaminación. En revisión. Libro que será editado por la UAEM.

### **Artículos en memorias de congreso**

#### **Nacionales**

Pedrero Izquierdo H., Garrido Hoyos S. y Pavón Silva T. (2000). Filtración rápida en un sistema integrado de potabilización de agua para comunidades rurales. V Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. 7 – 9 de junio del 2000. Acapulco Guerrero

Pavón Silva T., Chávez Guerra C. y Garrido Hoyos S. (2000). Puesta en marcha de un sistema de potabilización de agua para comunidades rurales. Actas XII Congreso Nacional 2000. Ciencia y Conciencia. Morelia Michoacán. 137 – 146.

Chávez Guerra C., Garrido Hoyos S. y Pavón Silva T. (2000). Optimización y rediseño de un sistema integral de potabilización para comunidades rurales. V Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. 7 – 9 de junio del 2000. Acapulco Guerrero

Piedra Pichardo M. Vieira Ibarra J, Pedrero Izquierdo H. Chávez Guerra C. Garrido Hoyos S. y Pavón Silva T. (2000). Experiencia en la puesta en marcha de un sistema de filtración. V Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. 7 – 9 de junio del 2000. Acapulco Guerrero

Pavón Silva T., Chávez Guerra C. y Garrido Hoyos S. (2000). Evaluación de una planta piloto compacta para el tratamiento de agua potable destinada a pequeñas comunidades. Simposio Aprovechamiento Integral del agua en regiones semiáridas. 19 – 20 Nov 1999. Queretaro.

### **Internacionales in extenso con arbitraje**

- Pavón Silva T., Chávez Guerra C. y Garrido Hoyos S.. (2001) Characterization of Sludge Produced in Drinking Water. Specialised Conference Sludge Management IWA. October 25 – 27, 2001. Acapulco México.
- Pavón Silva T., Chávez Guerra C. y Garrido Hoyos S. Pavón Silva T., Chávez Guerra C. y Garrido Hoyos S. (2001). Evaluation of a Package Plant for Small Communities. IWA. 2<sup>nd</sup> World Water Congress Efficient Water Management – Marking it Happen. 15 – 19 October 2001. Berlin. Germany. Memorias en CDROM
- Pavón Silva T., Chávez Guerra C. y Garrido Hoyos S. (2001). Drinking water with Clean Energy For Rural Communities In Mexico. IWA. 2<sup>nd</sup> World Water Congress Efficient Water Management – Marking it Happen. 15 – 19 October 2001. Berlin. Germany. Memorias en CDROM
- Pavón Silva T., Chávez Guerra C. y Garrido Hoyos S. (2000) XXVII Puesta en marcha de un sistema integrado de potabilización de agua aplicado a comunidades Rurales. Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Porto Alegre Brasil. Memorias en CDROM
- Pavón Silva T., Chávez Guerra C. y Garrido Hoyos S.. XXVI (1998). Planta potabilizadora para pequeñas comunidades. Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Lima Perú. Memorias en CDROM.
- Garrido Hoyos S., Chávez Guerra C. et Pavón Silva T.. (1999). Evaluation Á L'échelle pilote Dúne mini-usine Compacte de Traitement d'éua potable destineé aux petites Communautés rurales du Mexique. The Gateway to the Americas Environmental Industry. Pan-American. Environmental Technology Trade Show and Conference. March 24-26, 1999. Montreal Canada.

### **Presentaciones en congresos nacionales e internacionales**

- Garrido Hoyos S., Chávez Guerra C. and Pavón Silva T. (2001) Specialised Conference Sludge Management IWA. Acapulco México.
- Pavón Silva T., Chávez Guerra C. y Garrido Hoyos S. (2001). Evaluation of a Package Plant for Small Communities. IWA. 2<sup>nd</sup> World Water Congress Efficient Water Management – Marking it Happen. 15 – 19 October 2001. Berlin. Germany. Memorias en CDROM
- Pavón Silva T., Chávez Guerra C. y Garrido Hoyos S. (2001). Drinking water with Clean Energy For Rural Communities In Mexico. IWA. 2<sup>nd</sup> World Water Congress Efficient Water Management – Marking it Happen. 15 – 19 October 2001. Berlin. Germany. Memorias en CDROM
- Pavón Silva Thelma B.. (2000). Optimización y rediseño de un sistema de potabilización para comunidades rurales. V Congreso Nacional de Ciencias Ambientales y 1<sup>er</sup> foro de Empresarios Ambientalistas. Acapulco Guerrero.

Pavón Silva T., Chávez Guerra C. y Garrido Hoyos S. (2000) XXVII Puesta en marcha de un sistema integrado de potabilización de agua aplicado a comunidades Rurales. Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Porto Alegre Brasil. Memorias en CDROM

Pavón Silva T., Chávez Guerra C. y Garrido Hoyos S.. XXVI (1998) Planta potabilizadora para pequeñas comunidades. Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Lima Perú. Memorias en CDROM.

Pavón Silva Thelma B.. (1998). Tratamiento de agua para consumo humano. Plantel Cuauhtémoc Escuela Preparatoria.

### **Artículos en revistas de divulgación.**

Pavón Silva T., Chávez Guerra C. y Garrido Hoyos S. (2000). Potabilización de agua, puesta en marcha de un sistema para comunidades rurales. Tubos en Concreto. 65: 2- 6.

Pavón Silva T., Chávez Guerra C. y Garrido Hoyos S. (2000). Potabilización de agua, puesta en marcha de un sistema para comunidades rurales. Tubos en Concreto. 66: 2- 6.

Pavón Silva Thelma B. (1998). El agua y sus usos. Acondicionamiento para ser bebida. Revista de divulgación del conocimiento Científico y Educativo de la Facultad de Química. No. 8 febrero. 13 pag.

### **Dirección de tesis de licenciatura**

Chávez Guerra C. (2002). Evaluación de floculación sedimentación por manto de lodos en una planta potabilizadora para comunidades rurales. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química UAEMex.

Martínez Patiño Elizabeth. (2003). Estudio de factibilidad técnico-económica de una planta potabilizadora de agua para comunidades rurales. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química UAEMex. Junio 2003.

### **Difusión por radio**

Divulgación en radio programa *Uniradio Divulgación* con el tema *Agua potable*

## Resumen

En la presente investigación se evalúa un sistema integrado de potabilización de agua, diseñado para funcionar por gravedad, el cual cuenta con las operaciones unitarias de coagulación-floculación, sedimentación por manto de lodo y filtración. De manera independiente se cuenta con el sistema de desinfección, que consiste en producción de gases oxidantes (principalmente cloro) a través de energía solar usando como materia prima sal común.

Las cuatro primeras operaciones unitarias se encuentran integradas a través de un desarrollo tecnológico novedoso, el cual consta de cilindros de diferentes diámetros con secciones que tienen una inclinación de 45°, esto con el fin de establecer variaciones de velocidad dentro del sistema provocando regímenes de flujo en función del gasto de alimentación lo que controla cada una de estas operaciones unitarias.

La etapa de sedimentación que es por manto de lodo, además de concentrar el lodo, funciona como un filtro, a través del cual quedan retenidas las partículas más pequeñas que en un sistema convencional no serían detenidas. Así mismo la planta potabilizadora piloto (PPP) cuenta con un dispositivo de recirculación de lodo "recién coagulado" lo que permite reducir el gasto de coagulante y por consiguiente la reducción de lodo generado en el sistema.

La evaluación se realizó con tres tipos de agua tipo 1 de pozo, tipo 2 preparada sintéticamente con caolín simulando turbiedades entre 37- 40 UTN y agua preparada simulando características de agua superficial con turbiedades entre 200 a 240 UTN. Se probaron coagulantes naturales (mucilago de nopal), coagulantes inorgánicos (sulfato de aluminio, cloruro férrico) y polielectrólitos (Nalco® 8100, Nalco® 8103, Jordafloc® 555 FL18®, y povimal®).

Como resultados para el agua tipo 1 solo se aplicarán las operaciones unitarias de filtración y desinfección, para las aguas tipo 2 y 3 se podrán utilizar los productos povimal y cloruro férrico, ya que las características de los flóculos formados tienen el peso y consistencia requerida equilibrando la velocidad de sedimentación de estas partículas con la velocidad de ascensional formando así el manto de lodo, el cual alcanza una altura de 27 cm.

La producción de gases oxidantes (principalmente cloro) es suficiente para eliminar organismos patógenos del agua.

Las características del agua tratada cumplen con los parámetros establecidos en la normatividad vigente, sobre todo en cuanto a organismos patógenos se refiere, sin embargo se reitera que las condiciones hidráulicas de la planta son el principal factor para el adecuado funcionamiento del sistema.

Finalmente se recomiendan algunas mejoras en el diseño de la planta y el establecimiento de ella en algún sitio con el fin de que cumpla su cometido.

### Abstract

In the present research, it is shown an evaluation of an integral water refining system, which we designed to work by means of gravity, and it involves the unitary operations of flocculation-coagulation, sedimentation by means of floc blanket and filtration. In an independent way, a disinfection system is used and it consists on the production of oxidizers (mainly chlorine) through solar energy using domestic salt as common matter.

The first four unitary operations were integrated through a novel technological development, which consists on cylinders of different diameters with sections that have an inclination of 45°; this was done with the only purpose of establishing variations of speed inside the system causing specific flow performances in function of the feeding expense that controls each one of these unitary operations.

The floc-blanket used in the sedimentation stage, which holds the mud in it, works as a filter as well, through which the smallest particles that would not be stopped in a conventional system are retained. On the other hand, the pilot water-refining plant (PPP) has a device of recirculation of “recently coagulated” mud that allows us to reduce the expense of clotting and to reduce the amount of generated mud in the system.

The corresponding evaluations were carried out using three types of water, type 1 from a well; type 2, prepared synthetically with kaolin simulating turbidity among 37 - 40 UTN; type 3, prepared water simulating characteristics of superficial water with turbidity among 200 to 240 UTN. Natural clotting (nopal mucilage), inorganic clotting (aluminium sulphate, ferric chloride) and polyelectrolyte (Nalco® 8100, Nalco® 8103, Jordafloc® 555 FL18®, y povimal®) were tested.

On water type 1, the unitary operations of filtration and disinfection were applied. On water types 2 and 3, povimal and ferric chloride were used because of the characteristics of their floc, which has the required weight and consistency, balancing the speed of sedimentation of these particles with the ascendant speed, forming this way a floc blanket that reaches a height 27 cm.

The production of oxidizers (mainly chlorine) is enough to eliminate pathogenic organisms from water.

The characteristics of treated water fulfil the parameters settled down in the effective regulation, especially talking about pathogen organisms. However, it is necessary to make clear that the hydraulic conditions of the plant are the main factor for the appropriate operation of the system.

Finally, recommendations on some improvements in the design of the plant are done, as well to establish it where it works properly.

## Capítulo 1. Antecedentes

### 1.1. Problemática

Uno de los objetivos comunes del desarrollo y la conservación del ambiente consiste en propiciar las condiciones que mejoren el bienestar social y la calidad de vida, tanto para las generaciones actuales como para las futuras.

La explosión demográfica, las expectativas de consumo modernas, la intensa urbanización y la creciente industrialización, han determinado un uso irracional de los recursos naturales los cuales generan día con día, nuevos problemas ambientales agravando los ya existentes. La calidad de agua para consumo humano y los servicios sanitarios son de vital importancia por su impacto directo en la salud y en la calidad de vida

En la mayoría de los países en desarrollo los niveles de cobertura de los servicios básicos son insuficientes, por deficiencias en la infraestructura del saneamiento básico, agravándose esto en las zonas rurales.

El impacto de esas condiciones desfavorables, asociadas con factores como la desnutrición, se refleja en altos índices de morbilidad y mortalidad, principalmente infantil, y en una alta incidencia de enfermedades como las infecciones gastrointestinales y/o respiratorias, en las que el factor ambiental y la pobreza desempeñan un papel importante (OPS, 1992).

### 1.2. Cantidad de agua disponible en México

La calidad y la cantidad del agua procedente de aguas superficiales y subterráneas, como las dos fuentes principales, experimentan la influencia de la geografía, el clima y las actividades humanas. Las aguas subterráneas normalmente se pueden utilizar

con poco o ningún tratamiento. El agua superficial, por otra parte, suele necesitar tratamientos extensos, en especial si está contaminada.

La precipitación promedio en la República Mexicana es de 772 mm de lluvia al año, lo que equivale a 1 519 mil millones de m<sup>3</sup>. De ésta, el 70% se evapora y el resto, 456 mil millones de m<sup>3</sup>, escurre a través de los ríos y arroyos o recarga los acuíferos en el subsuelo. Si se divide esta agua entre el número de habitantes en el país en 1998, resulta que a cada mexicano le corresponden en promedio cerca de 4,977 m<sup>3</sup> de agua al año. (CNA, 2001). Sin embargo, la mayor parte de la lluvia se presenta en sólo cuatro meses del año; en tan sólo el 30% de la superficie del país. En el norte de México, se genera tan sólo el 4% del escurrimiento, mientras que en el 20% del territorio, en el sureste y zonas costeras, se genera el 50% del escurrimiento. Estas irregularidades espaciales y temporales plantean un reto especial en el manejo del agua del país.

La infraestructura hidráulica actual proporciona una capacidad de almacenamiento del orden de 150 km<sup>3</sup>. A lo largo del territorio se desarrollan 11 600 kilómetros de litoral, 1.5 millones de hectáreas de lagunas costeras y 2.9 millones de hectáreas de cuerpos de agua interiores, (CNA, 2001).

La recarga de los acuíferos se considera del orden de 75 km<sup>3</sup>/año, de los cuales se estiman aprovechamientos por 28 km<sup>3</sup>/año. Aproximadamente el 66% del agua subterránea extraída se destina al riego de una tercera parte de la superficie total regada; debido a su seguridad y flexibilidad de uso, el agua subterránea es de gran importancia para la producción agrícola (CNA,2001).

El 70% del volumen de agua que se suministra a las ciudades proviene del subsuelo, con lo que se abastecen aproximadamente 75 millones de personas (55 millones de los mayores centros urbanos y prácticamente 20 millones del medio rural).

Para lograr un mejor aprovechamiento y preservación del agua en el país la Comisión Nacional del Agua (CNA) ha desarrollado un importante proceso de planeación en el cual se promovió la participación de los usuarios y se planteó un manejo del agua por cuencas hidrológicas.

En ese contexto, con el fin de aplicar las políticas de manejo del agua en el marco de un desarrollo regional, se han establecido 13 regiones hidrológico-administrativas, conformadas por una cuenca o un conjunto de ellas con características hidrológicas similares entre sí, que facilitarán la aplicación de planes y programas de desarrollo.

En el Estado de México se encuentran, tres de las 13 regiones hidrológicas en las que está dividido el país, estas son la región IV del Balsas, conformada por dos grandes provincias fisiográficas: la Sierra Madre del Sur y el Eje Neovolcánico. Abarca 119 000 km<sup>2</sup>, 6% del territorio nacional, e incluye completamente al estado de Morelos y parcialmente a los estados de Tlaxcala, Puebla, México, Oaxaca, Guerrero, Michoacán y Jalisco con un total de 421 municipios.

La región VIII Lerma-Santiago-Pacífico la cual se concentra en la zona conocida como el “Bajío”, con producción agrícola y giros industriales que se desarrollan primordialmente en las ciudades de Toluca, Querétaro, Aguascalientes y Guadalajara (CNA, 2001).

La tercera región hidrológica, región XIII Valle de México, en la cual existe una problemática muy singular con relación al manejo de los recursos hidráulicos tanto en el contexto nacional como en el internacional, ya que la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) es una de las mayores concentraciones humanas del mundo, con fuentes superficiales prácticamente agotadas, representa un claro ejemplo de la vulnerabilidad del equilibrio ecológico ante el crecimiento incontrolado y la incesante demanda (CNA, 2001).

### 1.3. Abastecimiento de agua potable y saneamiento

#### 1.3.1. Situación actual

De acuerdo con los resultados del XII Censo General de Población y Vivienda 2000 (INEGI 2000). México tiene una población de 97.4 millones de habitantes. Por otro lado, los análisis del Consejo Nacional de Población (CONAPO) indican que la tasa de crecimiento ha disminuido de 1.7% en 1995 a 1.4% en el 2000. Aún con esta disminución en la tasa de crecimiento poblacional, se estima que en el año 2025 México tendrá 26 millones de habitantes adicionales y que la población seguirá creciendo hasta alcanzar un máximo de aproximadamente 133 millones en el año 2040, para luego empezar a descender (CNA/UPRPS, 2001).

La distribución de la población en México se puede observar en la tabla 1.1 en referencia al tamaño de localidad considerando tres divisiones que son ciudades urbanas (con población mayor a 50000 habitantes), de población media (2500 a 49999 habitantes) y comunidades rurales (menor a 2500 habitantes).

**Tabla 1.1. Distribución de la población por tamaño de localidad**

Tamaño de localidad (habitantes)	Número de localidades	Habitantes en viviendas particulares	Habitantes con servicio de agua potable	Cobertura (%)
<b>Rural</b>	<b>196,328</b>	<b>24,546,946</b>	<b>16,909,987</b>	<b>68.9</b>
2,500-4,999	1,580	5,423,481	4,762,903	87.8
5,000-9,999	711	4,929,008	4,485,994	91.0
10,000-14,999	237	2,891,524	2,662,435	92.1
15,000-19,999	109	1,871,707	1,739,217	92.9
20,000-49,999	226	6,821,471	6,310,785	92.5
<b>Ciudades medias</b>	<b>2,863</b>	<b>21,937,190</b>	<b>19,961,333</b>	<b>91.0</b>
50,000-99,000	64	4,521,846	4,360,179	96.4
100,000-499,999	84	20,216,824	19,488,071	96.4
500,000-999,999	20	12,394,414	12,121,065	97.8
1,000,000 y más	10	12,997,472	12,674,320	97.5
Ciudades grandes	178	50,130,556	48,643,636	97
<b>Subtotal urbana</b>	<b>3,041</b>	<b>72,067,746</b>	<b>68,604,969</b>	<b>95.2</b>
<b>Total</b>	<b>199,547</b>	<b>96,614,692</b>	<b>85,514,956</b>	<b>88.5</b>

Fuente: CNA/UPRPS/Sistema Nacional de Información con base en datos del XII Censo General de Población y Vivienda 2000.

En México existen 199,547 localidades, entre urbanas y rurales. En el caso de las localidades rurales, la cobertura en el servicio de agua entubada es de aproximadamente el 70%, y en la población urbana ésta supera el 95% pero de acuerdo a la zona geográfica del país en promedio se tiene el 88.5%, (CNA, 2001).

Si se hace un análisis desde 1990 en cuanto a la evolución de la cobertura de agua potable en el ámbito nacional, urbano y rural, se observa un incremento en las zonas urbanas de 88.5% en 1990 a un 95.1% en 1999 y para zonas rurales de 55.1% a 70% en el mismo periodo de tiempo. (CNA, 2001).

#### **1.4. Fuentes de abastecimiento de agua**

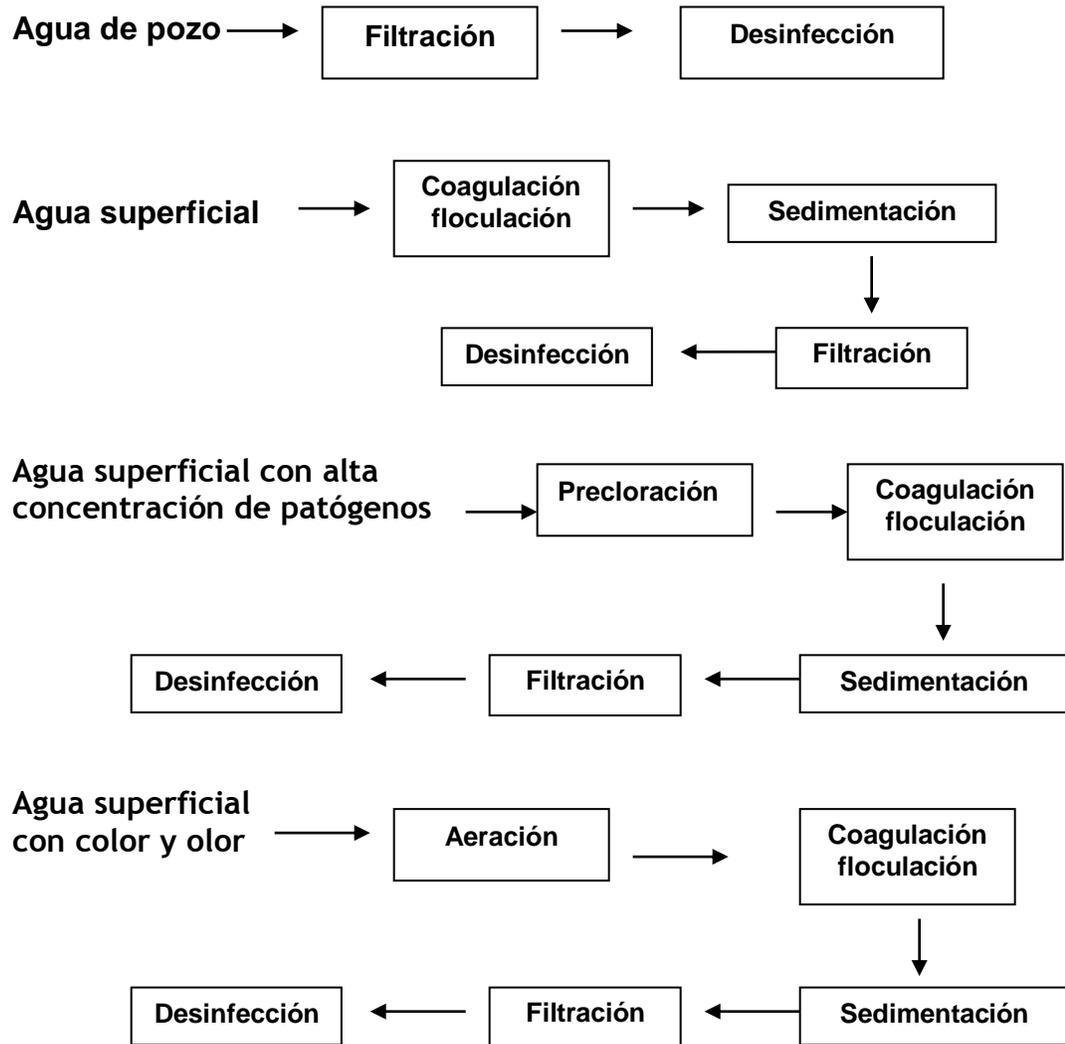
Las fuentes potencialmente utilizables de agua están constituidas por aguas superficiales: ríos, lagos naturales y artificiales, mares, entre otras, sin embargo su calidad varía dependiendo de las condiciones del medio en el que se encuentre y es afectada tanto por fenómenos naturales como por contribución antropogénica. De acuerdo con los criterios de la Organización Mundial de la Salud (OMS), se han establecido ciertas normas para determinar el tipo de contaminante y el tratamiento necesario, garantizando así, la confiabilidad del agua adecuada para consumo humano.

Con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor, se debe someter a tratamiento de potabilización. Para verificar su calidad la Secretaría de Salud y la CNA indican los límites permisibles de acuerdo a la norma NOM-127-SSA1-1994 para el agua para uso y consumo humano; misma que se presentan en el Anexo I.

#### **1.5. Conceptos generales de las operaciones unitarias utilizadas en la potabilización de agua**

Por potabilización se entiende, un conjunto de operaciones unitarias físicas y/o

químicas que se aplican al agua a fin de mejorar su calidad y hacerla apta para el uso y consumo humano. En la figura 1.1. Se muestran diferentes alternativas como tren de tratamiento de acuerdo a la calidad del agua de la fuente de abastecimiento.



**Figura 1.1. Tren de tratamiento (diversas alternativas) de acuerdo a la calidad de agua de la fuente de abastecimiento. Fuente: modificado de: Crites, 2000. Hofkes, 1988 y Fair 1987.**

### 1.5.1. Coagulación - Floculación

El proceso de coagulación-floculación se considera una sola etapa de tratamiento de potabilización de agua, debido a que son continuas. Una adecuada floculación

depende de la optimización de la adición de coagulante en concentración y régimen de flujo apropiados, lo cual a su vez depende de las características físicas químicas y biológicas del agua cruda. (Hudson *et al.*, 1967, Cupl, 1984).

La coagulación se define como la desestabilización de los sólidos suspendidos, y coloides por medio de un coagulante. La mezcla rápida es parte fundamental de la coagulación; cuyo propósito es tener una mezcla homogénea de los compuestos del agua (especialmente importante en la hidrólisis de sales como cloruro férrico y sulfato de aluminio), este paso, regularmente se lleva a cabo en fracciones de segundo, se reporta que para tener el mismo resultado cuando se escala a planta, se requiere un exceso de coagulante que va desde 30-40% (Di Bernardo, 1998a, Kawamura, 2000).

Vrale (1971), realizó un análisis de unidades hidráulicas de mezcla rápida concluyendo que un reactor tubular es el de mayor eficiencia, pero se debe tener en cuenta el punto de aplicación del coagulante.

Krasner *et al.*, (1995), indica que el proceso de coagulación involucra tres variables importantes que son el tipo de coagulante, la dosis del mismo y el pH de coagulación.

De acuerdo a Gray y colaboradores (1995), las características del hierro (III) en solución dependen del tipo de anión, del tipo y concentración de la base adicionada (alcalinidad del agua), de la tasa de mezclado, la temperatura y el tiempo.

En cuanto al aluminio es una especie más soluble comparada con el hierro y puede ser neutralizada en un alto grado sin presentar precipitación. El polímero  $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{+7}$  ha sido identificado como el mayor componente de las soluciones poliméricas de cloruro de aluminio (Yao *et al.*, 1989).

La floculación es el paso inmediato a la mezcla rápida. El propósito de ésta es aumentar el número de colisiones permitiendo la aglomeración de las partículas coloidales desestabilizadas a partículas sedimentables o filtrables, (Gray, *et al.*, 1995). Haarhoff (1998), considera una ventaja a los floculadores hidráulicos en cuanto a obtener un flujo pistón y ahorro en energía.

Algunas consideraciones que se deben tomar en cuenta para una mezcla rápida efectiva son:

- 1) Número de químicos a anexar y sus características
- 2) Condiciones locales.
- 3) Características del agua cruda
- 4) Características físicas de los productos químicos.
- 5) Pérdidas de carga posibles en la mezcla rápida y lenta.
- 6) Variaciones de flujo de agua cruda.
- 7) Tipo de proceso subsiguiente.
- 8) Costo de los productos químicos y tipo de mezclador y floculador.
- 9) Tratamiento efectuado
- 10) Otros factores.

Como se mencionó importancia de los gradientes de velocidad para estas etapas de acuerdo a Romero (2000) son: para mezcla rápida (coagulación) mecánica de 500 a 2000  $s^{-1}$ , hidráulica con difusor de 500 a 1000  $s^{-1}$  y para floculador mecánico de 15 a 75  $s^{-1}$  e hidráulico de 20 a 70  $s^{-1}$ .

Una vez que las partículas contenidas en el agua han sido floculadas, el problema es la separación de los sólidos del líquido, o sea las partículas coaguladas del medio en el cual están suspendidas. Esto se consigue dejando sedimentar el agua o bien filtrándola, o ejecutando ambas operaciones consecutivamente, por lo tanto a estos procesos se les considera como complementarios.

Recientemente Dae-Sung y colaboradores (2000); así como, Leeuwen 1997 y 1999 se apoyan en el uso de regresión multivariable y modelos matemáticos empíricos para predecir las dosis de coagulación de forma clara y precisa, debido a la variación que se presenta en el agua día con día, siempre y cuando se tenga una serie de datos históricos de la calidad del agua, para alimentar el software.

### 1.5.2. Sedimentación (proceso de clarificación)

Se entiende por sedimentación, la operación por la cual se remueven las partículas presentes en una suspensión gracias la fuerza de gravedad. La sedimentación realiza la separación de los sólidos más densos que contiene el agua y que tienen una velocidad de caída tal, que pueden llegar al fondo del tanque sedimentador en un tiempo aceptable. El término sedimentación comprende un grupo de mecanismos de asentamiento de acuerdo al tipo y concentración de sólidos o partículas suspendidas las cuales se resumen en la tabla 1.2. (Arboleda, 1993).

**Tabla 1.2. Clasificación de sedimentación**

Clarificación por tipo de sedimentación	Características de los sólidos en suspensión	Descripción del proceso	Ejemplos
1	Partículas discretas y aisladas en soluciones diluídas	No hay interacción entre la partículas ni entre las partículas y el resto del fluido	Movimientos de sedimentación de partículas en desarenadores o presedimentadores
2	Partículas aglomerables en soluciones relativamente diluídas	Las partículas se aglomeran agrupándose en partículas de mayor tamaño	Sedimentación de flóculos en decantadores horizontales de placas
3	Soluciones de concentración intermedia	Las partículas interfieren entre sí en un descenso manteniendo posiciones estables	Deposición de lodos en decantadores de flujo ascendente
4	Soluciones de concentración alta	Se forma una estructura entre las partículas que va modificándose lentamente con el tiempo	Compactación de depósitos de lodos.

Fuente: Arboleda 1993.

De acuerdo a Camp (1968) cuando la concentración volumétrica de sólidos excede en un 0.5% (5000 ppm) en volumen, se presenta una reducción de la velocidad de asentamiento, produciéndose una sedimentación denominada autointerferida y que responde al modelo de clarificación tipo 3, (Hudson 1965, Brown *et al.*, 1971).

El proceso de sedimentación de acuerdo con el sentido del flujo se clasifica en: sedimentadores de flujo horizontal (tasa de flujo de 8 a 18 m/h), de flujo vertical (tasa de 1.25 a 2.5 m/h), e inclinado o considerando flujo ascendente o descendente (tasa de 5 a 7.5 m/h) (Romero, 2000). En los diferentes tipos de sedimentadores se producen al menos dos tipos de clarificación por tipo de sedimentación, por ejemplo en el sedimentador de tipo horizontal, se presenta la clarificación tipo 2 y tipo 4 en la parte superior del reactor y en la tolva de recolección de lodo respectivamente. Para un clarificador del flujo ascendente se pueden presentar la clarificación tipo 2, 3 y 4 de acuerdo a la zona y al diseño de reactor, (Romero, 1995).

Las consideraciones a tomar en cuenta para el adecuado funcionamiento de un sedimentador son:

- 1) El tratamiento global del agua
- 2) La naturaleza de la materia suspendida en el agua
- 3) Velocidad de sedimentación de las partículas suspendidas
- 4) Condiciones climáticas locales
- 5) Variaciones de flujo dentro de la planta
- 6) Verificación de inexistencia de cortos circuitos dentro de la planta
- 7) Diseño general de la planta
- 8) Costo de la operación unitaria de sedimentación
- 9) Otros factores

Es de particular importancia el proceso de sedimentación con manto de lodo, ya que el desarrollo tecnológico presentado en esta investigación contempla una planta de tratamiento integral, la cual consta de las operaciones unitarias de coagulación,

floculación, sedimentación con manto de lodo y filtración. Más adelante se realizará una descripción detallada de lo que es la decantación con manto de lodo.

De acuerdo a Mult y colaboradores (1999, 2000) este tipo de sedimentación por manto de lodo, dio pauta para un reactor de lecho fluidizado de material granular (FLGM).

### **1.5.3. Filtración**

El objetivo básico de la filtración es separar las partículas y microorganismos que no han quedado retenidos en los procesos de coagulación o sedimentación. En consecuencia el trabajo que un filtro desempeñará dependerá de la eficiencia de los procesos anteriores.

Sin embargo dependiendo de las características del medio filtrante, de la combinación de medios de filtración, o en algunos casos ya se recomienda un recubrimiento del medio filtrante (Merkle *et al.*, 1996 Niquette *et a.*, 1998), se obtendrán mejores resultados en cuanto a la calidad del agua se refiere.

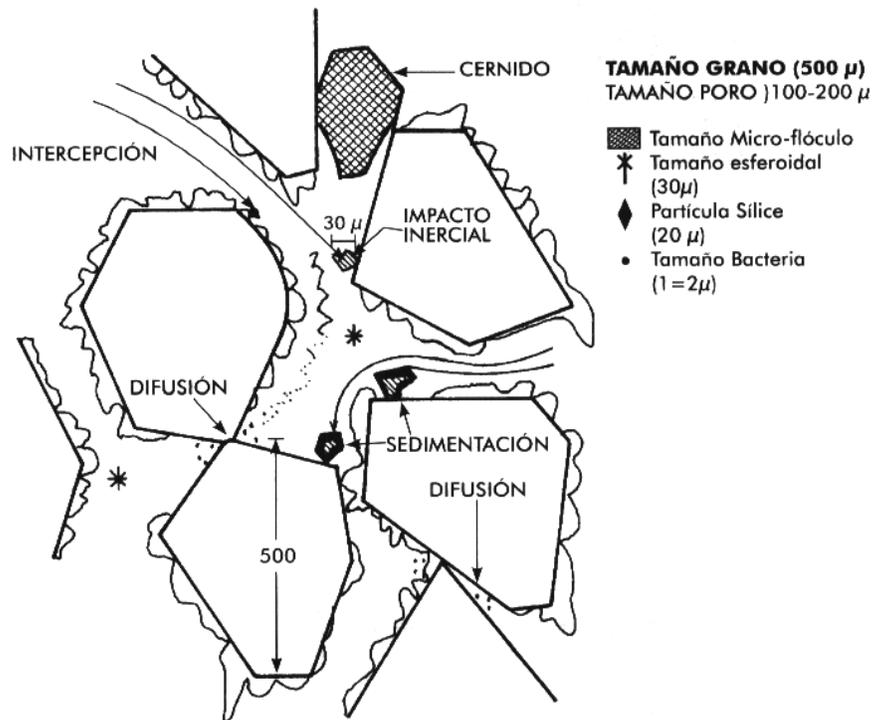
El proceso de filtración se efectúa con baja carga superficial (filtros lentos) o con alta carga superficial (filtros rápidos, y de alta tasa) a través de medios porosos o medios granulares, con flujo ascendente o descendente.

Se considera que el proceso de filtración ocurre en dos etapas complementarias: la de transporte de partículas dentro de los poros y la de adherencia a los granos del medio filtrante

El transporte de partículas se debe a fenómenos físicos e hidráulicos, influenciados por los factores que gobiernan la transferencia de masas. La adherencia es debida a fenómenos de acción superficial que son influenciados por parámetros físicos y químicos.

Los mecanismos que pueden realizar el transporte son:

Cernido, impacto inercial, intercepción, sedimentación, difusión y acción hidrodinámica, éstos se esquematizan en la figura 1.2.



**Figura 1.2. Mecanismos que se producen en el transporte de partículas en los granos del medio filtrante (FUENTE: Ritcher, 1993).**

#### Mecanismos de adherencia

El que cada contacto resulte efectivo y produzca o no adhesión de la partícula al medio filtrante depende de una serie de factores químicos y electroquímicos. La variación de estos factores induce a modificaciones en el comportamiento de los filtros. Así pues, los mecanismos que facilitan la adherencia son: las fuerzas de Van der Waals, el puente químico y las fuerzas electroquímicas

Se ha sugerido que existe el desarrollo de una película biológica sobre los granos de arena, que crea una superficie absorbente que favorece la adherencia, sin embargo

hay una segunda teoría, que dice que las enzimas extracelulares re-coagulan las partículas. Niquette y colaboradores (1998) concluyen que los filtros promueven condiciones anaerobias que reducen la densidad de las bacterias y a su vez la calidad del agua así como la tasa de filtración.

Weber-Shirk *et al.*, (1997), concluyen que mecanismos fisicoquímicos son responsables de remover partículas  $>2 \mu\text{m}$  y el mecanismo biológico remueve partículas  $< 2 \mu\text{m}$ .

Dentro de las características del medio filtrante que influyen en la filtración se tienen (Kawamura, 1996b); el tipo de medio filtrante, clasificándolo por lo menos con base en cuatro de sus características:

Tamaño efectivo: corresponde al percentil 10 ( $D_{10}$ ) en el análisis granulométrico del medio filtrante.

Coeficiente de uniformidad (CU): Es la relación entre el tamaño de granos correspondiente al percentil 10 ( $D_{10}$ ) y el correspondiente al percentil 60 ( $D_{60}$ ), es decir las aberturas de malla por las que pasan el 10% y el 60% del material.

Forma: la forma de los granos se evalúa de acuerdo con el coeficiente de esfericidad, el cual está relacionado con el diámetro de una esfera, de velocidad de sedimentación y el tamaño medio de los granos entre las dos mallas consecutivas de la serie granulométrica en las que se preparó el medio.

Peso específico (Pe): es el peso de los granos dividido por el volumen efectivo que ocupan los granos.

Cuando un filtro ha trabajado por un periodo de tiempo largo, las partículas e impurezas presentes en el agua han recubierto el material del filtro obstruyendo el paso del agua lo que obliga a limpiarlo.

Para filtros lentos se hace reemplazando las capas superficiales y para filtros rápidos lavando e invirtiendo el sentido del flujo normal de agua induciendo una fricción del líquido al pasar por entre las partículas del filtro para limpiarlo, esto se conoce como retrolavado del filtro. La tasa de filtración de retrolavado está entre 36 a 50.4 m/h con una expansión del lecho menor al 40%. En la tabla 1.3 se resumen las características del medio filtrante de acuerdo al tipo de filtración.

**Tabla 1.3. Características del medio filtrante.**

<b>Características</b>	<b>Filtración lenta</b>	<b>Filtración rápida</b>	<b>Filtración de alta tasa</b>
Tasa de filtración (m/d)	2 – 5 (< 12)	120	180 – 480
Medio	Arena	Arena	Arena-antracita
Distribución	No estratificado	Estratificado: fino a grueso	Estratificado: grueso a fino
Duración de la carrera.	20 – 60 d	12 – 36 h	12 – 36 h
Tamaño efectivo de la arena (mm)	0.15 - 0.35	0.45 – 0.55	
Coefficiente de uniformidad	2 – 4		
Espesor del lecho filtrante (m)	0.6 – 1.0	0.6 – 0.75	Antracita 0.4 – 0.6 Arena 0.15 – 0.3
Pérdida de carga (m)	Inicial: 0.6 Final: 1.2	Inicial: 0.3 Final: 2.4 -3.0	Inicial: 0.3 Final: 2.4 -3.0

Fuente: Romero 2000.

#### 1.5.4. Desinfección

Los procesos de coagulación, sedimentación y filtración remueven con mayor o menor eficiencia los microorganismos presentes en el agua, y son considerados como procesos preparatorios para la etapa de desinfección cumpliendo dos objetivos

básicos que son: disminuir la carga bacteriana del agua y hacer más eficiente el método de desinfección.

La desinfección del agua se refiere a la destrucción de los organismos causantes de enfermedades presentes en ella. Los principales son *Salmonellas*, *Shigellas*, *Vibrio cholera*, *E. Coli* en cuanto a bacterias. *Amoebas*, *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium* como protozoarios. Virus como el de la hepatitis o la poliomelitis y los entero-virus, o algunos nematodos como *Schistosoma manzoni* *Ascaris* entre otros, (Grenberg, 1981).

Un desinfectante debe de cumplir las siguientes condiciones para su uso:

- Debe ser capaz de destruir organismos causantes de enfermedades
- Debe de realizar esta labor a la temperatura del lugar y en un tiempo adecuado
- No debe hacer el agua tóxica para la salud o de sabor desagradable
- Debe ser de fácil obtención, sencillo manejo y bajo costo.
- Su concentración en agua debe poderse determinar prontamente
- Debe dejar un efecto residual para proteger el agua contra posteriores contaminaciones.

Considerando la desinfección por cloración, en donde se lleva a cabo a través de una reacción química ésta dependerá de factores como relación concentración – tiempo, temperatura, pH y número y tipo de organismos.

La eficiencia de la desinfección depende de la relación entre el tiempo de contacto y la cantidad de desinfectante dosificado. Una alta concentración necesitará menos tiempo para matar el 100% de los organismos que una concentración débil.

La temperatura del agua, es otro factor importante dentro del proceso de desinfección ya que de forma general los microorganismos se desarrollan a

temperaturas de entre los 5 a los 80 °C. A mayor temperatura más eficiente y rápida es la desinfección.

En particular, la desinfección por cloro (considerado el halógeno de mayor uso) reúne las ventajas de ser eficiente, fácil de aplicar y deja efecto residual (que debe estar comprendido en una concentración de 0.2 a 1.5 mg/L), que se puede medir por métodos simples y al alcance de todos. Sin embargo tiene las desventajas de ser corrosivo y formar subproductos peligrosos para la salud y producir sabor desagradable al agua. (Gallard, 2002, De Luca, 2000, Clark, 1998 y Greenberg, 1981).

El costo de una infraestructura adecuada para proveer a la comunidad del vital líquido resulta en muchas ocasiones alto, por lo que particularmente para la etapa de desinfección en América Latina se han realizado trabajos referentes a la producción de cloro in situ aplicando celdas electrolíticas (Rojas Vargas, 2000a y 2000b y Rojas, 2000) por lo que la presente propuesta, pretende ser una alternativa en el tratamiento de agua para consumo humano aplicado a comunidades rurales.

Debido a que las fuentes de abastecimiento presentan una concentración de materia orgánica natural, diversos autores (Gallard, 2002, Clark, 1998, Momba *et al.*, 2000, Monteagudo, 1998, White *et al.*, 1997), relacionan el uso de desinfectantes para el control microbiano con la formación de sustancias tóxicas.

### **1.6. Sedimentación con manto de lodo**

Como ya se mencionó, una vez que el agua ha sido floculada, es necesario separar éstas partículas del líquido, esto se consigue por un proceso de sedimentación o de filtración o con el uso de ambos que es lo comúnmente aplicado. La sedimentación o decantación con manto de lodo se describe a continuación.

El mecanismo de clarificación con manto de lodo es complejo, involucra floculación, entrapamiento y sedimentación, en la práctica el tiempo de contacto del agua dentro del manto de lodo es alto (mayor de una hora) (Gregory, 1979) lo cual es adecuado para el crecimiento del lecho de lodo y la eficiencia en el proceso de clarificación del agua es alta, debido a un entrapamiento físico por floculación y aglomeración análogo a la captura superficial en un medio filtrante que ocurre a través de éste manto de lodo. Sin embargo se considera de mayor importancia el proceso de entrapamiento mecánico de filtración (colador) que ocurre cuando las pequeñas partículas que van en flujo ascendente, no pasan a través de los vacíos entre las partículas que se encuentran comprimidas en un volumen que forma el manto de lodo. La eficiencia de este entrapamiento es afectada por el espacio entre las partículas suspendidas el cual es relacionado con la calidad del flóculo, la velocidad del agua, el tamaño de la partícula y el intervalo de distribución de ésta.

El desarrollo de los sedimentadores de flujo ascensional dio inicio desde 1869 por Sillar y Wigner quienes observaron que el lodo recientemente coagulado, al ser agregado a un agua turbia, tenía el poder de hacer precipitar partículas suspendidas y que este proceso podía repetirse hasta seis veces. El primer tanque desarrollado con esta tecnología es conocido con el nombre de tanque Dortmund, el cual consistía en una estructura de fondo cónico, a la cual entraba el agua cruda por la parte inferior y ascendía atravesando el manto de partículas en suspensión, hasta llegar a las canaletas superiores donde se recogía el agua clarificada. En este reactor el flujo era pulsante para mantener las partículas del manto en suspensión, (Arboleda, 1969).

Este tipo de unidad fue de uso común en Europa, hasta principios del siglo XX, teniendo la ventaja de que la recirculación de lodo mejoraba el proceso de separación de sólidos. Hacia los años de 1910 debido a problemas de operación, los sedimentadores con manto de lodo dejaron de utilizarse sustituyéndose por los de flujo horizontal aunque ocuparan mayor área. Sin embargo, el interés resurgió en 1932 cuando Spaulding obtuvo una patente para un sedimentador que seguía los

lineamientos generales de sus predecesores Europeos. A partir de este momento se empezaron a obtener patentes de una variedad de sedimentadores con manto de lodo, que no son sino modificaciones de los diseños básicos de finales del siglo XIX.

La clarificación del agua utilizando un proceso de sedimentación con manto de lodo, involucra necesariamente las operaciones unitarias de coagulación – floculación.

Las propiedades de flóculo tales como tamaño, forma, densidad y fuerza estructural, son sumamente importantes, sin embargo, no pueden ser medidos con facilidad y exactitud. La fuerza estructural, gobierna el tamaño que las partículas pueden alcanzar. El proceso de floculación involucra dos aspectos, el crecimiento del flóculo y la ruptura del mismo, así que se debe alcanzar un equilibrio en las condiciones de mezclado y tiempos para que pueda ser formado un intervalo en el tamaño de los flóculos. El análisis teórico de los sistemas de floculación es difícil, en la realidad la calidad del agua fluctúa de manera indeterminada, por variaciones diarias o estacionales, lo cual requiere cambios en las concentraciones de productos químicos a adicionar.

Diversos autores cuantifican el tamaño de partícula por medio de un equipo denominado contador de tamaño de partículas, sin embargo, para este tipo de lodo, el flóculo formado es muy frágil, por lo que se romperá al momento de realizar la determinación Hannah *et al.*, 1967, Tekippe *et al.*, 1970, LeChevallier *et al.*, 1992, Hargesheimer *et al.*, 1998, Andral *et al.*, 1999. Otros autores utilizan el equipo para determinar esporas de bacterias después de una filtración Beard *et al.*, 1977 y Ndiogue 2000.

De acuerdo con Gregory (1979), el término lodo se reserva para describir la concentración de flóculos formados en sedimentadores con manto de lodo, dentro de un proceso de potabilización. Por lo tanto se refiere al lodo formado como flóculos en suspensión con el término manto de lodo (floc blanket).

Debido a la necesidad de equilibrar la velocidad de flujo ascensional con el peso de las partículas que conforma el lecho de lodo los primeros tanques se hicieron cilíndricos y con flujo intermitente, de tal forma que la velocidad de flujo ascensional era constante. Al observar el alto contenido de agua en estos lodos, la necesidad de un tanque de almacenamiento para el agua cruda y el poco espesor de la capa de lodo al reiniciar el proceso (debido a la interrupción del mismo para extraer el lodo) se observó que se trataba de un asentamiento auto-interferido de partículas, cuyo aumento de concentración por la aglomeración con lodo fresco incrementaba con cierta rapidez el espesor de la capa filtrante, haciendo necesario interrumpir el funcionamiento de la planta para extraerlo. También se observó que el efluente hacia el final de la carrera de sedimentación era más claro, cuando los flóculos más pequeños tenían un tiempo máximo de contacto con coágulos envejecidos, pasando a través de capas de mayor espesor.

Por estas razones, se orientó el diseño a conservar su espesor o nivel constante de lodos y a recircular los coágulos envejecidos más pesados con el fin de que una velocidad de ascenso variable mantuviera la porosidad decreciente y ordenara hacia arriba las partículas de menor tamaño. Estos fueron los motivos para adoptar las formas tronco cónica y tronco piramidal de la base, las cuales permiten mantener la velocidad de ascenso variable y rebosar los lodos menos pesados hacia el efluente para re-coagularlos con otros de mayor tamaño y después de estar suficientemente envejecidos, retirarlos por la parte inferior con un menor contenido de agua.

Cuando se inició el uso de este tipo de tanques, la zona de salida contaba con un vertedero periférico. Se observó que se producían zonas muertas para efecto de sedimentación hacia el centro de los tanques y en consecuencia se sobre elevaba la tasa de desbordamiento (carga superficial) adoptada para este diseño. Por esta razón se adicionaron a la zona de salida, vertedores radiales para hacer el flujo más uniforme a través de la sección horizontal.

Arboleda y colaboradores (1969) indican que para lograr distribuciones de velocidad aceptables, la carga sobre la salida debe ser inferior a  $180 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$  esto es más de tres veces y media más pequeña que la carga máxima de un sedimentador de flujo horizontal y la altura mínima de la capa de lodo hacia el vertedor debe ser mayor a  $L_v/2$ , donde  $L_v$  es la distancia entre vertedores.

Ventajas y desventajas de sedimentadores con manto de lodo.

#### Ventajas

- Operan con tasas de derrame más altas que los sedimentadores de flujo horizontal capaces de remover partículas de idénticas características
- Forman unidades compactas con los floculadores, ocupando menor área que un proceso convencional
- Son especialmente eficientes en el proceso de precipitación química como ablandamiento con cal o remoción de hierro y manganeso.
- Son más económicos en su costo inicial que los tanques convencionales, pero el volumen de agua utilizado para retirar los lodos es alto.

#### Desventajas

- Requieren de supervisión constante para operarlos adecuadamente
- Tienen menor flexibilidad de operación que los tanques de flujo horizontal para absorber variaciones de caudal de características de agua cruda o dosis de coagulantes.

#### 1.6.1. Carga superficial del manto de lodo

Los flóculos formados después de la coagulación por sales de aluminio o hierro, en un tanque de flujo horizontal son removidos a cargas superficiales de entre 22 a 38  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$ . Los tanques de flujo ascensional para el mismo tipo de productos químicos pueden funcionar a tasas de entre 50 a 60  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$ . (Arboleda, 1969). 2-8 cm/min

(30m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d – 120 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d). Ritcher (1993). Por otra parte, es importante recordar que la aplicación adecuada de coagulantes, los gradientes y tiempos de coagulación y floculación son de primordial importancia para el adecuado funcionamiento de una unidad de sedimentación, es decir que si alguna de las primeras etapas no ha sido optimizada, la etapa de sedimentación no resolverá el problema.

Cailleaux y colaboradores (1992) determinaron las características del lodo en la etapa de floculación, demostrando que la optimización de la clarificación requiere de la obtención de sólidos densos que incrementen la velocidad de sedimentación y disminuyan la tendencia de rompimiento del flóculo.

El tiempo de retención suele estar entre 1 y 1.5 horas, la concentración de sólidos en el manto varía entre 10 y 20% del volumen. La profundidad del manto es diferente según el tipo de unidad (entre 1 y 3 m). Cuanto mayor sea la altura del manto mayor será la remoción de turbiedad. Arboleda (1993), Pérez Carrión *et al.*, (1992) reportan parámetros operacionales para unidades con manto de lodo como se marcan en la tabla 1.4.

**Tabla 1.4. Parámetros operacionales para unidades con manto de lodo**

Parámetros	Valor	Unidad	Factores
Cargas superficiales	50 – 70 70 – 90 90 40 60 – 70 90	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d	Turbiedad < 100 UTN Turbiedad 100 – 1000 UTN Turbiedad > 1000 UTN Remoción de turbiedad coloidal Remoción de turbiedad + polímeros Ablandamiento
Altura del manto	1 – 3	m	
Tiempo de retención	1 – 15	h	
Concentración de lodo	10 – 20	%	Características de sólidos

Fuente: Pérez Carrión *et al.*, (1992).

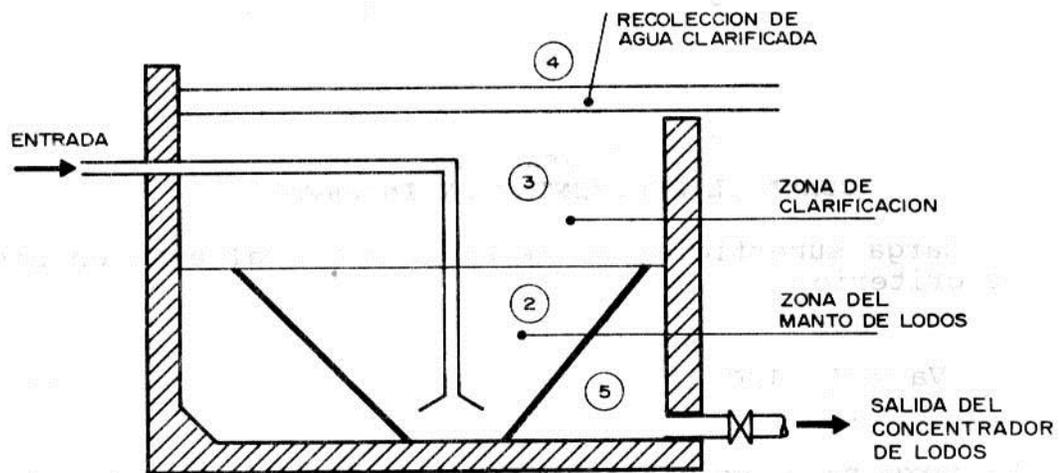
### 1.6.2. Clasificación de los sedimentadores con manto de lodo.

Conocidos también como clarificadores de flujo vertical, pueden clasificarse básicamente en dos tipos: los de manto de lodo de suspensión hidráulica y los de

suspensión mecánica. En ambos casos, los procesos de mezcla, floculación y sedimentación se realizan en la misma unidad estableciéndose una sedimentación de tipo 2 y 3 razón por la cual se suelen llamar también reactores clarificadores.

Componentes de una unidad con manto de lodo.

Una unidad con manto de lodo consta básicamente de los componentes que se representan en la figura 1.3.



**Figura 1.3. Componentes de un sedimentador con manto de lodo.**  
(Fuente: Ritcher, 1993).

### Unidades con manto de lodo de suspensión hidráulica.

En los sedimentadores con manto de lodo de suspensión hidráulica, las partículas de lodo quedan suspendidas debido a la fuerza de arrastre del agua que asciende hasta las canaletas de salida, y en los de tipo mecánico un sistema de agitación es el que produce la turbulencia necesaria para mantener cierta proporción de sólidos en suspensión.

Por otra parte, existen aquellos que tienen o no vertedores superiores para control de nivel o aquellos que cuentan con recirculación de lodo, tal como se observa en la tabla 1.5.

Las unidades con manto de lodo de suspensión hidráulica, consisten en un tanque de fondo cónico o tronco piramidal, en la parte inferior del cual se inyecta el agua cruda y el coagulante que ascienden disminuyendo la velocidad a medida que el área aumenta, y manteniendo así un manto de lodo hidráulicamente suspendido. El lodo se extrae periódicamente a través de un tubo que baja hasta el fondo. La entrada de agua debe hacerse inyectando el flujo directamente al fondo cuidando que no se provoque una excesiva turbulencia que pueda perturbar el manto de lodo, esto puede hacerse inyectando el flujo directamente en el fondo para que se produzca un amortiguamiento al chocar con las paredes del fondo.

**Tabla 1.5. Características de sedimentadores con manto de lodo.**

<b>Forma de mantener el manto suspendido</b>	<b>Sistema de mezcla de los lodos</b>	<b>Sistema de control de la altura del manto</b>	<b>Tipo de flujo</b>
Hidráulico	Sin recirculación	Con vertedero de lodos	Constante Pulsante
		Sin vertedero de lodos	
Mecánico	Sin recirculación	Con vertedero de lodos	Constante con separación dinámica Constante con separación simple
	Con recirculación	Sin vertedero de lodos	

Fuente: Arboleda, 2001.

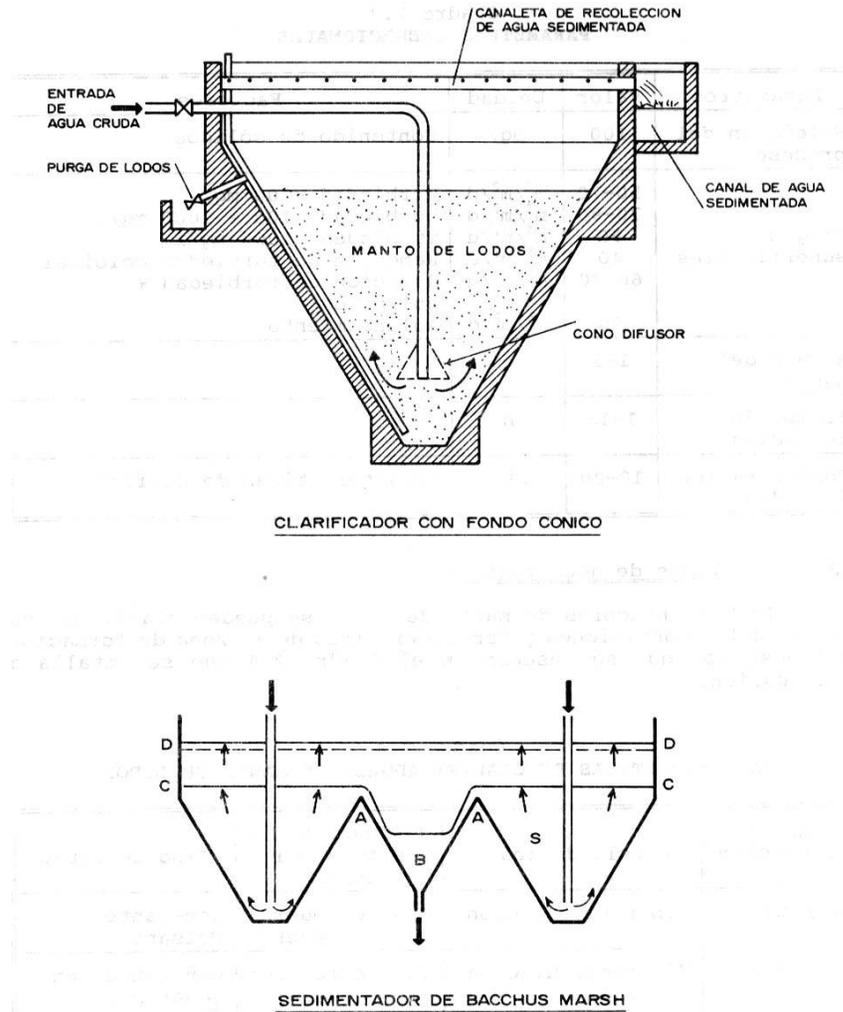
Para obtener un rendimiento adecuado del manto del lodo, debe ponerse especial atención a la forma de entrada del agua, ya que una excesiva turbulencia producirá perturbaciones que afectan el manto de lodo. En la figura 1.4. se observan dos tipos de sedimentadores con manto de lodo de suspensión hidráulica, el llamado clarificador de fondo cónico y el Bacchus Marsh (Richter *et al.*, 1993)

### **Unidades con manto de lodo de suspensión mecánica.**

Las unidades con manto de lodo de suspensión mecánica, utilizan un dispositivo mecánico para mantener el manto de lodo en suspensión, éstos pueden ser: pulsantes o de vacío, de agitación y de separación.

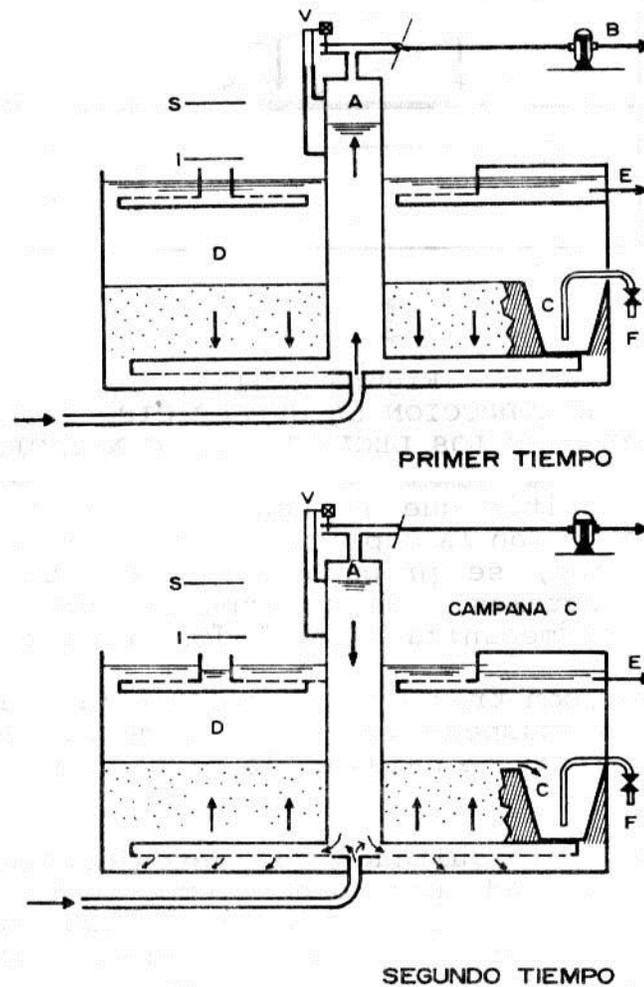
Unidades pulsantes o de vacío.

Las unidades pulsantes o de vacío consisten esencialmente en un tanque cuadrado o circular, en cuyo centro se coloca una campana o cápsula de vacío, en la cual periódicamente se disminuye la presión interna con una bomba especial, de modo que el agua ascienda por la campana, hasta un cierto nivel y luego se descargue al tanque produciendo expansión del lodo y eliminando el exceso de los mismos hacia los concentradores.



**Figura 1.4. Sedimentadores con manto de lodo de suspensión hidráulica**  
(Fuente: Ritcher, 1993).

Esta expansión y contracción periódica del manto se usa para homogenizarlo, evitando las grietas o canales que permitan el paso directo de la turbiedad y la sedimentación de las partículas más pesadas en el fondo. La figura 1.5. muestra el sedimentador pulsante en los dos momentos de pulso.



**Figura 1.5. Sedimentador de pulso en los dos tiempos del pulso.**  
(Fuente: Ritche, 1993).

Unidades con separación dinámica.

Estas unidades emplean una turbina que gira a alta velocidad, colocada en el centro del tanque, la cual impulsa el flujo hacia abajo a través del flujo periférico A, de forma que las partículas que descienden empujadas por la energía mecánica de la turbina choquen con las que ascienden con el flujo del tanque.

En estos tanques se pueden considerar cuatro zonas: la primera de mezcla y reacción en la parte inferior donde se inyectan los coagulantes; la segunda zona de mezcla lenta y floculación; la tercera zona donde se establece el manto de lodo y la cuarta zona en la que el agua clarificada sube hasta la canaleta de salida. El lodo es recogido en el concentrador y extraído automáticamente cada cierto tiempo según la turbiedad del agua. En la figura 1.6a se muestra el decantador Brno, en el cual el manto de lodo queda suspendido hidráulicamente en las secciones tronco piramidal laterales, y tiene un serie de vertedores sumergidos para controlar la altura del manto. El lodo es recogido en los concentradores inferiores y extraído periódicamente.

La figura 1.6b muestra el decantador con recirculación de lodo Aquazur de Degremont, el cual dispone de una zona central de floculación rodeada por una zona de decantación. Estas dos se comunican por arriba y por abajo. El agua cruda llega por un caudal circular situado alrededor de la columna central de mezcla. Al ser abierto, no existe peligro de obstrucción de dicho canal. Una turbina situada en la parte superior de la zona de floculación, hace que el agua floculada pase a la zona de decantación. El lodo que sedimenta en esta última vuelve por gravedad, a la zona central produciendo el enriquecimiento del lodo favoreciendo la formación del mismo.

La figura 1.6c muestra el acelerador desarrollado por infilco INC., el cual cuenta con un agitador mecánico distinguiendo perfectamente la zona de mezclado rápido o mezcla primaria, la zona de mezcla secundaria en la cual a través de unas mamparas pasan a la zona de clarificación con recirculación del lodo por la parte inferior del mismo y el exceso de lodo es depositado en una zona de concentración para después descargarlo.

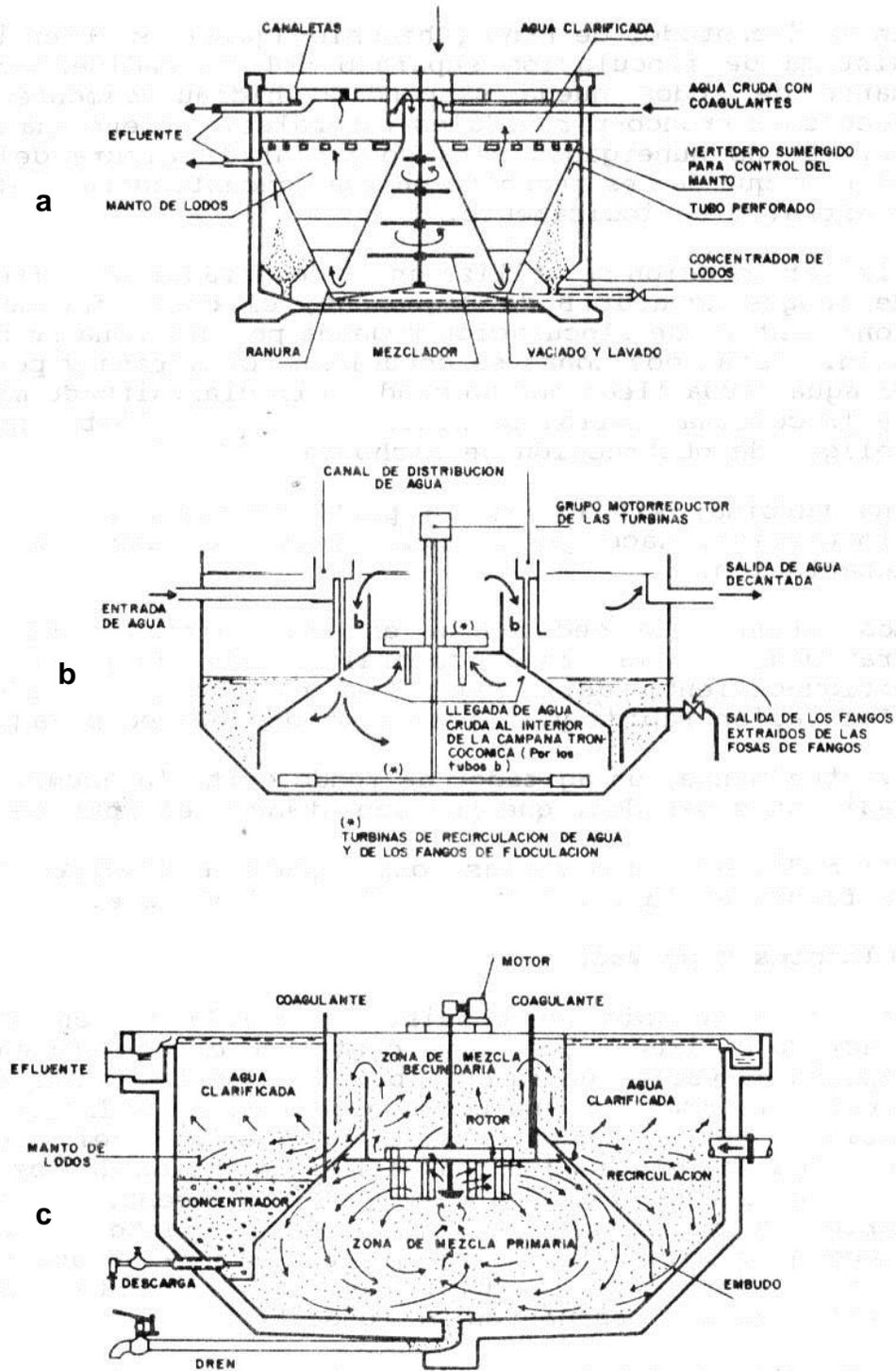


Figura 1.6. Unidades de sedimentación con manto de lodo de separación dinámica  
 a) Decantador Brno b) Decantador Aquazur c) Decantador acelerator  
 (Fuente: Ritcher, 1993).

### 1.6.3. Aspectos químicos de la sedimentación

no depende solamente de los parámetros físicos, sino también de los aspectos químicos. Un sedimentador con manto de lodo es extremadamente sensible a éstos. Los cambios en el pH o en la dosificación pueden producir deterioro de las características del lodo, pérdida de la interfase o fluidización total o parcial.

Dada la alta concentración de partículas que hay en el manto de lodo, (10 – 20% del volumen), existe una mutua interferencia (agua-lodo) en la velocidad de sedimentación con la que caen, de modo que el manto se puede considerar como un filtro de flujo ascendente, en el que los granos del medio filtrante están constituidos por coágulos preestabilizados, suspendidos por la fuerza ascensional de fricción del flujo.

En el proceso, el flóculo no conserva su peso, su tamaño ni su forma constante. Las partículas pequeñas que entran en el fondo, son arrastradas por el flujo y al chocar unas con otras incrementan su tamaño, hasta adquirir un volumen tal que, caen chocando con las que suben.

Por lo anterior, las características del lodo formado son fundamentales para que se tenga una formación adecuada del manto de lodo, entre éstas se pueden mencionar: la velocidad de sedimentación, el tamaño del flóculo, la constante de cohesión del lodo, así como su densidad, viscosidad y peso específico. (Garrido *et al.*, 2001)

### 1.6.4. Aspectos hidráulicos de la sedimentación

Los tanques con manto de lodo se construyen en forma de tronco piramidal o tronco cónico con el objeto de que la velocidad del agua disminuya con la altura, puesto que el área superficial aumenta. La pendiente hace que los lodos puedan resbalar por las paredes con facilidad. Se crea en estas condiciones un flujo inestable, en donde la velocidad de flujo a través del manto de lodo se incrementa hacia el centro y es casi

nula en las paredes. Por esta razón, la concentración de lodo junto a la pared es entre 3 y 4% mayor que en el centro, sin embargo, suele ser relativamente uniforme a velocidades bajas. En cambio, cuando la velocidad ascensional es alta o se emplean sistemas de agitación mecánica, la concentración puede ser bastante variable.

El régimen que se establece dentro del manto de lodo se puede considerar turbulento en el que las partículas suben y bajan a veces con un movimiento rotacional (Arboleda 2000).

Durante el proceso, el agua atrapada entre las partículas asciende desplazada por los sólidos con una velocidad  $v_d$  en dirección opuesta a la velocidad  $v_s$  de caída de las partículas individuales. Por lo tanto, la velocidad de asentamiento de la interfase  $v_i$  será igual a:

$$v_i = v_s - v_d = \frac{h_1 - h_2}{t} \dots\dots\dots(1.1)$$

Donde  $h_1-h_2$  indica la diferencia de alturas de la interfase de lodo en una columna (probeta de 1L), con respecto al tiempo.

Se consideran entonces cuatro velocidades de importancia:

- la primera es la velocidad ascensional del agua  $v = Q/A$  en la que  $Q$  es el gasto con que trabaja la unidad y  $A$  es el área superficial.
- La velocidad intersticial,  $v_d$ , del flujo que asciende por entre las partículas y que podría expresarse como  $v_d = Q/pA$ , donde  $p$  es el porcentaje de área libre no ocupada por las partículas, por lo tanto  $v_d = v/p$
- La velocidad de caída de la partícula,  $v_s$ , considerada como si descendiera sola en un líquido en reposo sin interferencia de las otras.

$$v_s = [2g/Cd((\rho_p - \rho_l)/\rho) V_p/A_p]^{1/2} \dots\dots\dots(1.2)$$

donde:  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ),  $C_d$  es el coeficiente de arrastre adimensional,  $\rho_l$  es la densidad del líquido ( $kg/m^3$ ),  $\rho_p$  es la densidad de la partícula ( $kg/m^3$ ),  $V_p$  es el volumen de la partícula ( $m^3$ ) y  $A_p$  es el área de la partícula ( $m^2$ )

- La velocidad de asentamiento de la interfase  $v_i$  que es diferente de la velocidad de caída de las partículas individuales  $v_s$ .

Estudios reportados por Arboleda (2000) en cuanto a la velocidad de asentamiento de la interfase, aplicando diferentes concentraciones de lodos añejados a los cuales se les había añadido 0.01 mg/L de un polielectrolito (magnafloc), se observó que a mayor concentración de partículas, menor fue la velocidad de caída de la interfase y menor la velocidad de ascenso necesaria para mantener el flujo en suspensión. En cuanto a la calidad del agua clarificada ésta fue mejor para el agua con las concentraciones mayores de partículas en el manto de lodo.

Teóricamente para la condición de equilibrio:  $v_i - v = 0$  y por tanto:

$$v_i = v \dots\dots\dots(1.3)$$

Como  $v = Q/A \dots\dots\dots(1.4)$

Reemplazando de acuerdo con 1.1. se tiene que:

$$Q = [(h_1 - h_2) / t]A \dots\dots\dots(1.5)$$

Por lo tanto, lo que determina la carga superficial de la unidad es la velocidad de descenso de la interfase,  $v_i$  con respecto al área  $A$ .

Por otro lado, como  $v_i$  es función de la concentración del manto puede expresarse en dos formas al peso y al volumen. En el primer caso se expresa como el peso de los

sólidos desecados que hay en un determinado volumen unitario del líquido (g/L). En el segundo caso, como el volumen de sólidos compactados por volumen unitario de líquido (mL/L o fracción L/L).

### **Porosidad y concentración del manto de lodo.**

Cuando a un lecho de partículas floculentas se le inyecta un flujo ascendente con una velocidad  $v$ , si esta velocidad es menor que la velocidad de descenso de la interfase  $v_i$  ( $v < v_i$ ), no se produce expansión y el lecho permanece en reposo.

Al incrementar la velocidad  $v$  y al hacerla mayor que  $v_i$  ( $v > v_i$ ) el manto se expande paulatinamente disminuyendo en él la concentración de las partículas y aumentando la porosidad hasta hacer que ( $v \approx v_i$ ), *momento en el cual la expansión cesa y la interfase conserva la misma posición adquirida, mientras no cambie ni la temperatura ni la densidad de las partículas.*

Durante el proceso, algunos flóculos pueden ser arrastrados por las fuerzas de fricción del fluido hasta las canaletas de salida. Si la velocidad  $v$  se incrementa aún más, la expansión aumenta proporcionalmente, hasta llegar a un punto en el cual el manto se rompe y se fluidifica acarreado el lecho por el flujo ascendente.

Si antes de llegar a este límite, se disminuye la velocidad  $v$ , la concentración del lodo aumenta, disminuyendo la porosidad con lo que la interfase desciende hasta alcanzar el equilibrio  $v \approx v_i$

En este momento los sólidos del manto están en un estado de equilibrio inestable, que depende de la concentración de las partículas suspendidas. Cualquier variación de esta concentración, se traduce en un ascenso o descenso de la interfase con mayor o menor acarreo de sólidos en el efluente.

Como  $v_d = v/p$  por lo tanto

$$v = v_d p \dots\dots\dots(1.6)$$

Cuando hay equilibrio, la velocidad Intersticial  $v_d$  debe ser igual a la velocidad de descenso no interferido de los sólidos, o sea que  $v_d = v_s$  y por consiguiente:

$$v = v_{sp} = p [4/3 g/Cd((\rho_p - \rho_l)/\rho) d]^{1/2} \dots\dots\dots(1.7)$$

**1.6.5. Investigaciones relacionadas con sedimentación con manto de lodo**

Miller y West (1968) desarrollaron pruebas en un clarificador de manto de lodo acoplado con un filtro empleando como coagulantes sulfato de aluminio y cloruro férrico en diferentes dosis, con una velocidad de flujo ascensional de 10.16 cm/min, analizando el efecto de pH para la formación del manto de lodo y la etapa de filtración, este se puede considerar un estudio pionero en la sedimentación por manto de lodo, ya que da recomendaciones sobre futuros estudios a realizar.

Tesarik (1967), estudió el funcionamiento de una suspensión en una columna simulando clarificación por manto de lodo encontrando que, la concentración de sólidos en el efluente y la fracción de espacios vacíos en el manto se incrementan con una velocidad de flujo ascensional y, la concentración del manto medida después de dos horas fue constante. Así mismo, concluyó que la densidad y la concentración del lodo formado dependen de la calidad del agua cruda y del coagulante utilizado, debiendo tomar en cuenta la temperatura debido al cambio en la viscosidad del agua lo que implica una menor capacidad de remoción en invierno.

El modelo matemático utilizado por Tesarik (1967) para el cálculo de la velocidad en el manto de lodo, fue revisado por Ives (1968) recalculando estas velocidades las cuales son mayores a las calculadas por Tesarik, 0.06 a 0.13 cm/s utilizando sulfato de aluminio, 0.12 a 0.25 cm/s aplicando sulfato de aluminio con sílica activada y de 0.08 a 0.20 cm/s con sulfato de aluminio clorinado.

Ives (1968) desarrolló el primer estudio teórico de sedimentación por manto de lodo basado en los principios de floculación ortocinética con el manto, llegando a una ecuación que predice la remoción de partículas en el clarificador. Como parámetros de cálculo utiliza la concentración de la solución (C), el gradiente de velocidad (G) y el número de partículas  $n_t$  y  $n_o$  a los tiempos t e inicial, sin embargo, en esta aproximación (ecuación 1.8) Ives no indica el valor de concentración de lodo y utilizando valores típicos de G, C y t se obtiene una eficiencia de remoción del orden de  $10^{-10}$  lo cual está fuera de la realidad.

$$n_t/n_o = \exp(-GCt/\pi) \dots\dots\dots(1.8)$$

Gregory en 1979, indica que la eficiencia de un sistema de sedimentación con manto de lodo está determinada por muchos factores como la calidad del agua y sus efectos estacionales, el tratamiento químico, la forma del tanque, las condiciones de flujo de entrada, entre otros. Así pues, todos los siguientes efectos de calidad y concentración de los flóculos en el manto son el resultado de la clarificación:

- I. Flujo de agua – es necesario conocer y entender las variaciones en un ciclo anual
- II. Coagulación – una coagulación eficiente depende de un flujo medido y controlado, un cambio en el control del tratamiento químico, un efectivo mezclado rápido y un orden apropiado en retardar el tiempo de adición de productos químicos.
- III. Distribución de flujo – canales y tubería de entrada deberán ser diseñados para no tener pérdidas de carga. El diseño básico del tanque debe ser simple y la entrada a la zona de formación del manto de lodos debe ser dimensionada apropiadamente, con los accesorios necesarios para obtener una adecuada distribución del flujo y la estabilidad del manto de lodo.
- IV. Control del manto de lodo – la buena calidad del agua depende de una efectiva eficiencia del nivel del manto de lodo, el control en la remoción del exceso de flóculos, la estabilidad en el manto para garantizar la fácil separación y el entrapamiento mecánico.

Gregory reconoce la importancia de la concentración y el volumen de los flóculos y sugiere que las partículas son removidas debido a un entrapamiento mecánico por el crecimiento completo del flóculo que forma el manto de lodo.

- V. Remoción de partículas del agua – los canales o conductos de salida de las tuberías no deben de tener pérdidas de carga innecesarias. Así mismo, define un óptimo de concentración del manto de lodo de entre 14 y 18%.

Gould en 1974, sugiere que la concentración debe estar relacionada con la cuantificación, medida en el manto de lodo con un método reproducible.

Dos teorías del proceso de clarificación son establecidas. La teoría de flujo de sólidos, (Takacs, 1991) desarrollada para clarificadores secundarios en tratamiento de agua residual y aplicada por Gregory 1996 (citado por Head, 1997) con resultados promisorios. Y la segunda teoría que es más complicada por lo complejo de programación necesaria propuesta por Clarke y Wilson, donde los valores obtenidos son poco parecidos a los reportados en trabajos reales.

Galvín Marin (1992) realizó estudios adaptando un sedimentador con manto de lodo (pulsator) con placas paralelas, obteniendo una adecuada calidad del agua tratada con un aumento en el gasto de alimentación y una reducción de coagulante en un 14.5%.

Wang *et al.*,(1993a y b), en un estudio de cinética de un proceso de manto (Pellets) fluidizado en el cual, su objetivo es caracterizar el movimiento de las partículas sólidas en una columna, utilizando partículas de caolín coloreadas con azul de metileno manteniendo una velocidad constante de 18 m/h y agitación constante, trabajando diferentes concentraciones de caolín. Concluyendo que partículas de mayor tamaño se mantienen en la parte baja de la columna.

Head (1997), uso un modelo matemático para predecir lo que sucede en el manto de lodo, de acuerdo con datos experimentales como altura del manto de lodo (H), velocidad de flujo ascensional (v) y velocidad de sedimentación de los flóculos ( $v_s$ ) así como su concentración, llegando a predecir con bastante certeza lo que ocurre con un lecho de manto de lodo teniendo los datos adecuados. Ecuación 1.9.

Debido a que la interfase sube y baja de acuerdo con un equilibrio de velocidades y la forma del sedimentador, el cambio de posición en la superficie del manto puede ser expresado como un diferencial de la altura del manto de lodo, ( $dh$ ) con respecto al tiempo, esto es un equilibrio entre las velocidades de sedimentación y la velocidad de flujo:

$$dh/dt = v - v_s \dots\dots\dots(1.9)$$

Para simular el proceso de sedimentación se aplicó una versión modificada al modelo de Barnea-Mizrahi (citado por Head, 1997), ecuación 1.10.

$$v_s = v_{max} [1 - s(C - C_{min})]^n \dots\dots\dots(1.10)$$

Donde:  $C_{min}$  define el punto de reducción en la parte final de una curva de sedimentación por compresión, por debajo de la suspensión,  $v_{max}$  es la velocidad de sedimentación en la parte inferior del manto de lodo  $C_{min}$ ,  $c$  es la concentración de la suspensión (mL/mL),  $s$  es la forma del lodo y  $n$  es un factor exponencial.

Sin embargo, no es claro el valor que toma la forma del lodo y el factor exponencial, sólo se aclara que dependen de los efectos de la temperatura por los cambios en la viscosidad del fluido.

En diversos trabajos Panswad y Areesawangkit (2000), Panswad (2000), Panswad y Polwanich (1998) han estudiado en una columna de flujo ascendente la formación de pellets y su fluidización con diferentes velocidades de flujo, así como variando otras

condiciones como turbiedad del agua (agua de río), dosis de coagulantes y uso de polímeros, relación coagulante turbiedad o polielectrólito turbiedad, entre otros.

Llegando a conclusiones como tiempos para la formación de una masa que permite la retención de partículas, y la necesidad de recircular estas partículas para aumentar la eficiencia del agua clarificada, debido al rompimiento de las partículas se disminuye también la dosis de coagulante.

Se puede considerar que la masa de pellet presente en el reactor es un factor clave para aumentar la eficiencia en la remoción de turbiedad (2 - 10 UTN). La masa de pellet (220 – 270 g) en el reactor decrece con la relación  $Q_R/Q$  (tasa de recirculación), porque el impacto de arrastre es mayor con la velocidad de recirculación de pellets al vacío cm/min. La masa de pellets formado se incrementa con el incremento del polímero, debido a que puede proveer enlaces más fuertes en la desestabilización de las partículas, Panswad and Areesawangkit (2000).

Panswad y Polwanich (1998), concluyen que para remover turbiedad entre 20 y 240 UTN en agua de río, la velocidad del lecho fluidizado es de 20 cm/min con dosis de Al de 1.5 a 3.8 mg/L como óxido de aluminio y con 0.3 mg/L de polímero obteniendo una turbiedad en el efluente menor a 5 UTN. Siendo menor la cantidad de aluminio requerida comparada con otro tipo de sistemas de decantación. La densidad del pellet determinada de acuerdo con la ley de Stokes fue de entre 1.06 y 1.1 g/cm<sup>3</sup>.

Panswad y Chan-Narong (1998), concluyen que un proceso de fluidización es adecuado para remover turbiedades bajas de agua sintética (50 UTN) a una velocidad de flujo ascensional de 40 cm/min utilizando 2 mg/L de PACl con 0.1 mg/L de polímero sin necesidad de aplicar unidad de mezclado lento.

Tangerino y colaboradores (1998), realizaron experimentos modificando un sedimentador de manto de lodo con placas paralelas y lo compararon con un decantador de placas paralelas antecedido por un floculador tipo Alabama.

Realizaron ensayos a diferentes cargas superficiales ( $90 - 180 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ ) y tiempos de retención, para diferentes turbiedades ( $30 - 150 \text{ UTN}$ ) obteniendo una mayor remoción de turbiedad con el sedimentador con manto de lodo modificado.

Matsumoto *et al.*, (2000a, b), con sus investigaciones dan continuidad al trabajo realizado por Tangerino, complementando lo que es el proceso de coagulación floculación a un filtro convencional de arena, comparando los coagulantes sulfato de aluminio e hidroxiclورو de aluminio y dos polímeros catiónicos. Obteniendo mejores resultados con el hidroxiclورو de aluminio, bajando la turbiedad residual de  $25 - 30 \text{ UTN}$  a menos de  $1 \text{ UTN}$  y con sulfato de aluminio a menos de  $3 \text{ UTN}$  en las mismas condiciones. El tiempo de retención se reduce al tener el sedimentador de alta tasa. Así mismo la altura alcanzada del manto de lodo está entre  $60$  a  $80 \text{ cm}$ .

Como antecedentes de sistemas integrados de potabilización de agua Clark (1994, 1980 y 1981) reporta desarrollos conocidos como plantas paquete, las cuales están integradas con un sistema compacto (preconstruidas) y de fácil operación, recomendados para obtención de agua para consumo en un sitio específico (zona urbana) removiendo contaminantes microbiológicos y coloidales.

Finalmente en la India Bhole, (1982) reporta el diseño (de bajo costo), de una planta paquete para áreas rurales, de fácil transportación, montaje sencillo y sin requerimientos de energía eléctrica, el sistema está compuesto por una unidad de dosificación de aluminio, un floculador hidráulico de forma cónica estratificada con flujo ascendente, que en la zona de entrada se lleva a cabo la coagulación, la sedimentación es de alta tasa, seguida de un filtro de arena y la desinfección es con cloro líquido, el costo de la planta es de £1150.

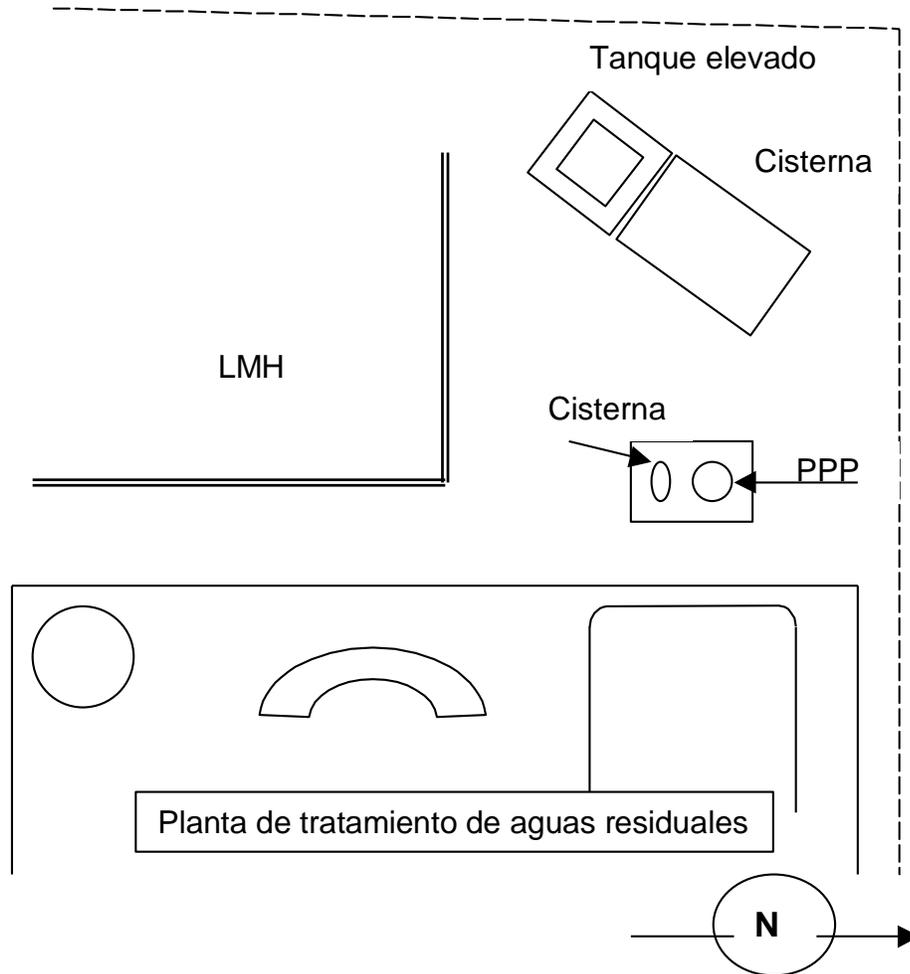
## **1.7. Ubicación y descripción de la planta potabilizadora piloto (PPP)**

### **1.7.1. Historia de la PPP**

La planta potabilizadora piloto fue diseñada en 1996 por el Dr. Ignacio Allende Abreu, misma que se mandó construir bajo su dirección (Fundición y Maquinaria del Centro S.A.), por diversas razones el Dr. Abreu regresa a su país sin haber dado término al modelo en construcción. A partir de este momento se inicia el proyecto como tesis doctoral que se describe en este documento, el que incluye la finalización del modelo en construcción, puesta en marcha, operación, evaluación. Por otra parte la Universidad Autónoma del Estado de México financió parte de ésta investigación. Proyecto clave 1205/97.

Esta PPP se encuentra ubicada en las instalaciones de la Universidad Autónoma del Estado de México, Unidad San Cayetano formando parte de las instalaciones del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA). Esta situada a un costado del laboratorio de Modelos Hidráulicos (LMH) y entre la planta de tratamiento de aguas residuales y el tanque elevado, de acuerdo al siguiente croquis de localización. Figura 1.7.

Se inician trabajos de investigación con el prototipo con el fin de dar seguimiento en su funcionamiento, se observó la necesidad de realizar cambios para su mejor operación, así como la construcción de una serie de válvulas que sirvieran como puntos de muestreo para las determinaciones que se requerirán.



**Figura 1.7. Croquis de ubicación de la planta potabilizadora piloto.**

### 1.7.2. Descripción y dimensiones de la PPP

Este prototipo en especial, está construido para fines didácticos en lámina de acero inoxidable No. 18 (1.2141 mm), formado por cuatro unidades concéntricas de acuerdo con la siguiente descripción.

En el plano A-01 se observa la PPP en perspectiva colocada sobre un soporte de concreto, el sistema está conformado por cuatro cilindros concéntricos de 50, 200, 1100 y 1700 mm de diámetro respectivamente, con una altura total es de 3040 mm.

Así mismo, se observan una serie de válvulas de compuerta las cuales corresponden a los puntos de muestreo de la etapa de manto de lodo y clarificación (puntos de

muestreo 4 a 13 lado izquierdo de la PPP) las primeras cinco con una separación de 90 mm entre ellas las dos siguientes de 150 mm y las últimas dos con 300 mm de separación. Existen cuatro válvulas del lado derecho tres de ellas corresponden al control de salida de agua de retrolavado de la unidad de filtración y la cuarta válvula corresponde a la purga de lodo en la zona de formación del manto de lodo.

En la parte inferior del sistema (Plano A-01) se muestra la tubería de entrada y salida de agua a la PPP, de acero galvanizado, cuenta con un coplee metálico, 1 coplee plástico, 5 codos 190.5 mm, 4 "T" todos con diámetro de 190.5 mm (3/4"). La tubería es alimentada con una bomba casera de  $\frac{3}{4}$  de caballo con una alimentación máxima de 1.2 L/s.

Al lado derecho del plano se observan cinco válvulas, las cuales tienen las siguientes funciones de acuerdo a la operación de la planta.

- Válvula de alimentación de la planta (V1), es la que permite la entrada de agua independientemente de la fuente de alimentación (cisterna o tanque elevado).
- Válvula de alimentación del tanque elevado (V2), es la que permite la alimentación de agua para tratamiento o para el retrolavado.
- Válvula de alimentación de la cisterna (Rotoplas® de 4 m<sup>3</sup>) (V3), ésta permite la entrada de agua a la planta para tratamiento o retrolavado.
- Válvula de salida del agua tratada (V4) que pasa a la unidad de desinfección.
- Válvula de retrolavado (V5), esta válvula permite la alimentación del agua de retrolavado que será conducida al filtro manteniendo la válvula V4 cerrada.

Así mismo se cuenta con una manguera de alimentación conectada a una bomba dosificadora de capacidad variable (dosificación máxima 1.8 L/h), que alimenta el producto químico seleccionado como coagulante.

En el plano A-02 se muestra una vista en planta de la PPP indicando un corte transversal A – A' donde se describe el funcionamiento en las diferentes unidades de

la planta, puntos de muestreo para evaluación de cada una de las unidades, y dos detalles, de tubería de la alimentación y la recirculación de lodo.

## **Funcionamiento**

El agua cruda entra por la parte inferior de la planta con un flujo ascendente, e inmediatamente se realiza la adición del coagulante en la unidad concéntrica de 50 mm la cual es considerada unidad de mezclado rápido.

En la parte superior de esta unidad y debido a la velocidad del flujo se forma un chorro ascendente (fuente) después de la cual, el agua cae por la unidad concéntrica de 200 mm de diámetro (primera etapa de la unidad de floculación) con 1850 mm de longitud en flujo descendente hasta llegar a la tolva 2 (segunda etapa de floculación, con pendiente de inclinación de 45°). En este punto se separan las partículas por peso donde las más pesadas son conducidas a la parte inferior de la tolva 1, incorporándose parte de estas a la unidad de mezcla rápida.

Las partículas de menor peso son arrastradas por el flujo ascendente a la etapa de sedimentación donde se forma el manto de lodo hasta aproximadamente la parte superior de la tolva 2. A continuación el agua filtrada por el manto de lodo pasa a la zona de clarificación, con una longitud de 1850 mm y 1110 mm de diámetro, siendo el flujo ascendente.

Por último el agua es conducida a la unidad de filtración (último cilindro 1700 mm de diámetro), con flujo descendente. El lecho filtrante es mixto, compuesto por arena sílica y arena de río con una altura de 350 mm, cuenta con 100 mm de gravilla y un soporte de grava de 170 mm, lo que suma una altura total de 620 mm.

En el detalle de la recirculación de lodo se muestra la reducción que genera la turbulencia para desestabilizar las partículas coloidales la cual cambia de 40 a 10 mm de diámetro, y que posteriormente pasan a la tubería de 50 mm de diámetro que

corresponde a una extensión de la unidad de mezclado rápido. En este punto se encuentra un dispositivo que permite la recirculación de lodo que se describe en el plano A-03, el cual cuenta con siete orificios de forma oval de 10 por 15 mm, un tornillo que tiene la función de graduar el espacio de abertura de estas entradas y un orificio en el centro que permite la entrada del afluente a la tubería de mezclado rápido.

Una vez que el agua ha sido tratada en la PPP pasa a la unidad de desinfección (plano A-04) la cual cuenta con 2 paneles solares (1x75 m), que alimenta con un amperaje máximo de 4.57 A, a un acumulador 12 V, esta batería a su vez hace funcionar a la celda electrolítica dividida por una membrana semipermeable. La cual contiene una solución saturada de sal común y una solución de sosa cáustica en cada uno de los compartimientos, como producto de las reacciones se produce principalmente  $\text{Cl}_2$  (g) que es alimentado al efluente mediante un tubo Venturi. (Barrott *et. al* 1994. Rojas, 2000a y 2000b. Brust-Carmona *et al.*, 1996, 1998).

Una descripción más detallada de los componentes de la celda electrolítica se observa en el plano A-05. Los compartimientos de la celda solar están comunicados por una membrana semipermeable, el ánodo es un electrodo de titanio-rubidio y es la celda que contiene la solución de cloruro de sodio, el cátodo está compuesto de acero inoxidable y contiene la solución de sosa, en el ánodo está conectada una manguera que conduce principalmente el gas cloro y los gases oxidantes hacia un tubo venturi para mezclar éstos con el agua a desinfectar. En la figura 1.8 se presenta una fotografía de la planta.

### **1.7.3. Mantenimiento de la PPP**

El mantenimiento de la PPP se referirá a tres puntos principales. El primer punto, el considerado de mayor importancia es la tolva inferior (tolva 1), ya que el flóculo producido cuando la planta está en operación se acumula en esta zona en el

momento en que el sistema deja de funcionar. Se debe de realizar una limpieza después de operar la planta.

El segundo punto es referente a la zona de manto de lodo, ya que se cuenta con una zona, en la que se acumula el lodo y se extrae por la válvula de purga de lodo. Se debe realizar la purga del lodo acumulado aproximadamente cada 2 h de operación.

El tercer punto es la parte superior de la PPP, ya que ésta se encuentra a la intemperie y con el tiempo acumula basura que es arrastrada por el viento, así como excremento de aves y en ocasiones animales que se quedan atrapados.

### **1.8. Justificación del trabajo**

En los últimos años se ha buscado incrementar la cobertura de los servicios hidráulicos, con el fin de hacer llegar a la mayor parte de la población un recurso básico como lo es el agua potable.

Es por tanto necesario el desarrollo de tecnología que sea de fácil operación y mantenimiento, con el fin de tratar agua para consumo humano, sin riesgo de enfermedades de origen hídrico para comunidades rurales.

Para mejorar la calidad del agua en zonas rurales se ha propuesto una serie de plantas paquete, las cuales integran diferentes operaciones unitarias en un tamaño compacto considerando una efectividad en costos y de relativa fácil operación (Clark, 1980, 1981 y 1994, Greering, 2000).

El prototipo de la presente investigación es un sistema integrado de potabilización de agua, el cual tiene las ventajas: de ser flexible en el número de las operaciones unitarias aplicadas, dependiendo de la calidad del agua a tratar, trabajar con base en cargas hidráulicas (salvo en la dosificación del coagulante) y de tener un bajo costo de operación y mantenimiento.

Por último a diferencia de las mencionadas plantas paquete que utilizan un reactor para cada operación unitaria a aplicar, esta investigación, presenta un desarrollo tecnológico que utiliza la sedimentación con manto de lodo, el cual tiene la ventaja de reducir el costo de coagulante. (Tesarik, 1984).



**Figura 1.8. Fotografía de la planta potabilizadora piloto**













## CAPÍTULO 2. Hipótesis, objetivos y alcances

### 2.1. Hipótesis

La calidad de agua que se obtiene a través del proceso de potabilización con el sistema integrado que trabaja por gravedad, depende de la adecuada formación del manto de lodo, de los parámetros de diseño y operación, de las condiciones hidráulicas del sistema y de la calidad de agua cruda.

### 2.2. Objetivos

Objetivo general

Evaluar el comportamiento de un sistema integrado convencional de potabilización con manto de lodo, que trabaja por gravedad, para diferentes calidades de agua como fuente de abastecimiento, aplicado a comunidades rurales.

Objetivos específicos

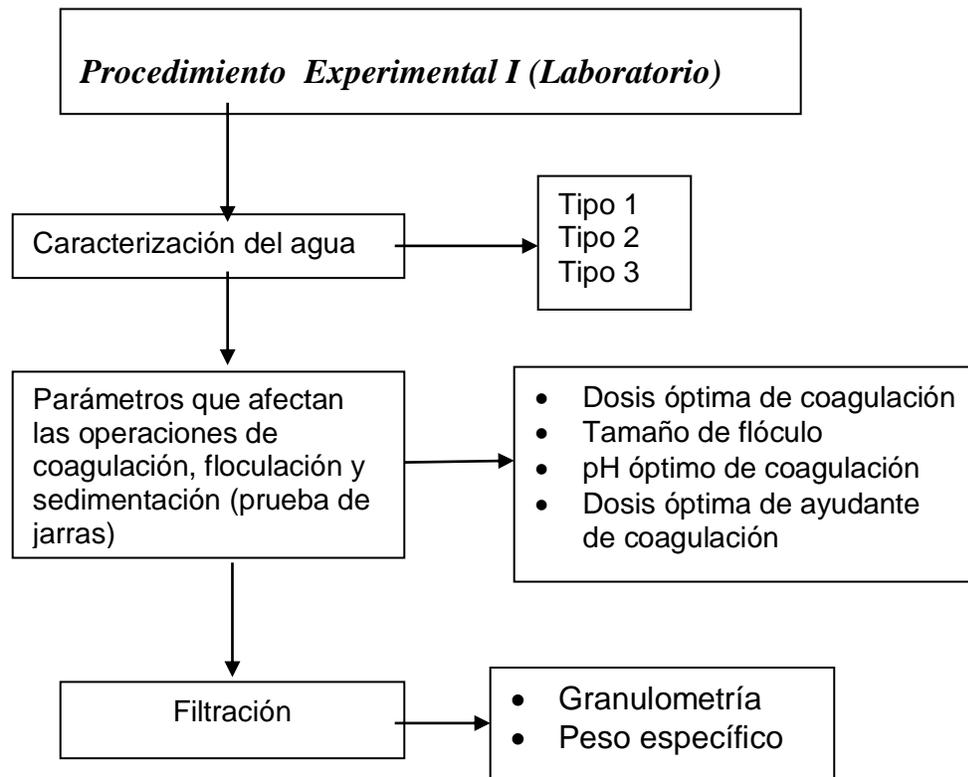
- 1) Describir y caracterizar los diferentes tipos de agua empleados en la experimentación.
- 2) Determinar las condiciones de operación en el laboratorio a través de la prueba de jarras y filtración.
- 3) Determinar los parámetros teóricos de diseño y operación de cada una de las etapas del sistema integrado de potabilización.
- 4) Explicar el comportamiento hidráulico de la PPP, de acuerdo al gasto de alimentación.
- 5) Evaluar los parámetros de diseño y operación en la planta de acuerdo al tipo de agua a tratar.
- 6) Elaborar una propuesta de manual de operación y control de la PPP.
- 7) Explicar el comportamiento del manto de lodo como función de la velocidad ascensional, tomando como base las características del flóculo formado, al coagulante empleado y al tipo de agua a tratar.

### 2.3. Alcances

- 1) Caracterizar el agua de las distintas fuentes de abastecimiento (físicoquímica y microbiológicamente).
- 2) Establecer de acuerdo a las pruebas de laboratorio (prueba de jarras), las condiciones de operación de la PPP
- 3) Optimizar el uso de productos químicos definiendo el más adecuado en cuanto a la eliminación de componentes indeseables del agua.
- 4) Obtener los parámetros teóricos de diseño y operación y comparar con datos experimentales.
- 5) Realizar pruebas de pérdida de carga y con trazadores para evaluar el comportamiento hidráulico del sistema.
- 6) Obtener agua para uso y consumo humano que cumpla con la normatividad vigente.
- 7) Explicar el funcionamiento del manto de lodo de la PPP como un sistema integrado para tratar agua de diversas fuentes de abastecimiento, siendo posible su aplicación en comunidades rurales

### Capítulo 3. Metodología

El desarrollo experimental fue dividido en dos etapas. La primera consistió en pruebas realizadas en el laboratorio con el fin de optimizar el coagulante a emplear utilizando la prueba de jarras, así como determinar las características del medio filtrante (Figura 3.1). Esto se realizó de acuerdo a diversos autores: Fernández, (1990), Arboleda, (1974), Fair, (1987), Degremont (1979), Ritcher (1993), Kawamura (1996a, 1996b) Stanley (1995).



**Figura 3.1. Descripción de las actividades realizadas en el laboratorio.**

La segunda etapa consistió en la realización de pruebas en planta, con el fin de evaluar cada una de las operaciones unitarias en cuanto a pérdida de carga, comportamiento hidráulico, comportamiento del sistema de acuerdo a la calidad de agua de abastecimiento, y comportamiento del manto de lodo para obtener una calidad de agua que cumpla con la normatividad vigente. Así mismo, se realizaron

los cálculos teóricos para comparar con los datos obtenidos experimentalmente, en la figura 3.2 se muestra el desarrollo de la segunda etapa.

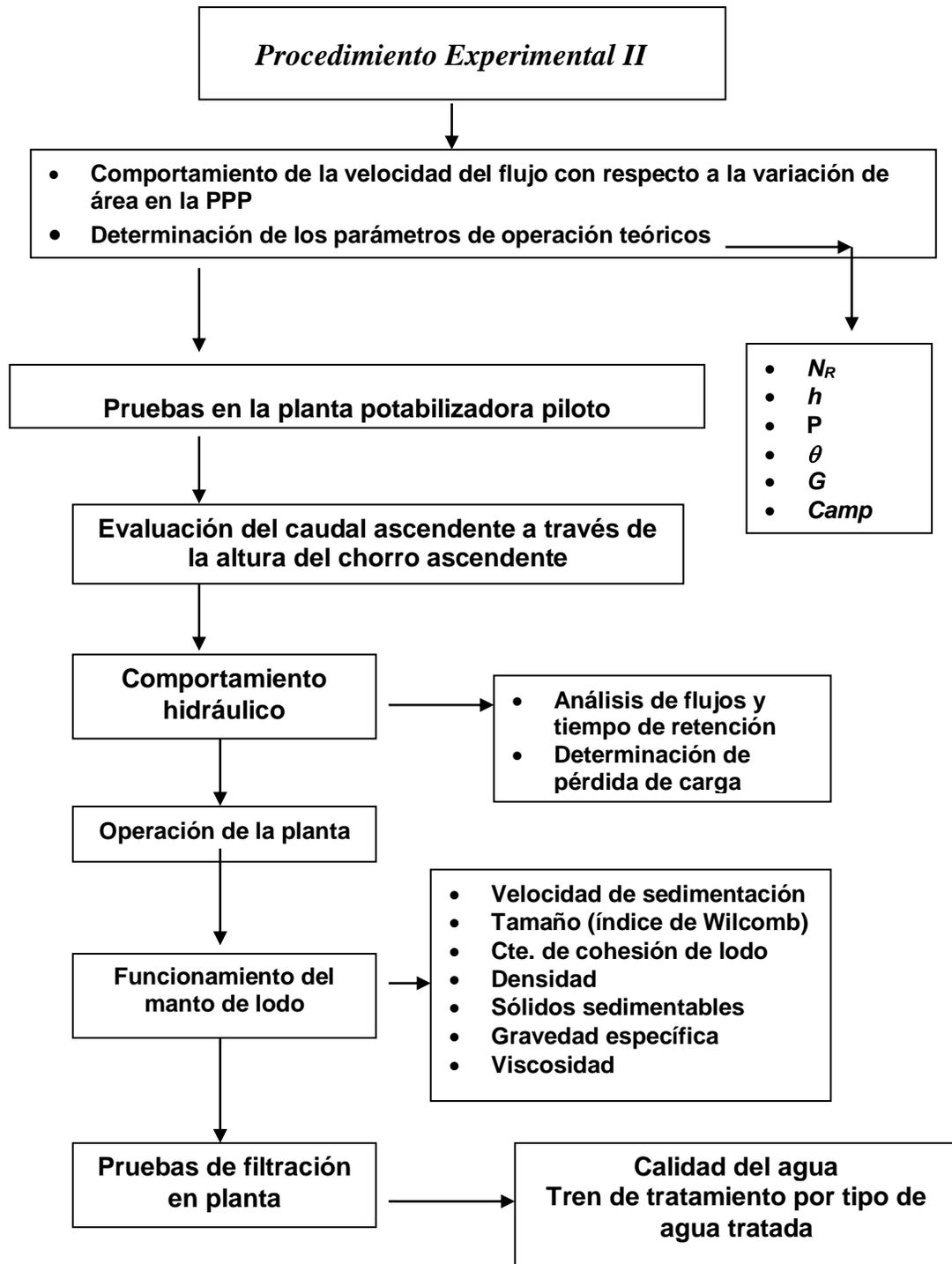


Figura 3.2. Descripción de las actividades realizadas en la planta piloto

### 3.1. Procedimiento experimental I (pruebas en el laboratorio)

#### 3.1.1. Descripción y caracterización de los diferentes tipos de agua empleados en la experimentación.

Con el fin de cubrir la calidad de diversos tipos de agua en el presente trabajo se experimentó con tres calidades de agua.

El primer tipo de agua es denominada “agua tipo 1” que se extrae de un pozo cercano a las instalaciones del CIRA para distribución en las mismas, esta agua se almacena en una cisterna de 423 m<sup>3</sup> de capacidad, misma que se recicla para realizar pruebas en el laboratorio de modelos hidráulicos, que al ser utilizada se contamina y presenta crecimiento de algas, razón por la cual se tiene que clorar.

El segundo tipo de agua es tomada de la cisterna antes mencionada y es preparada artificialmente con caolín (25 g/L) estableciendo un ámbito de turbiedad de entre 35 y 40 UTN.

El tercer tipo de agua es sintética, que simula las características de agua superficial, con turbiedad entre 110 y 550 UTN (preparada a partir de la adición de tierra de la zona). En lo sucesivo, para referirnos a estas aguas será como: tipo 1, tipo 2 y tipo 3 respectivamente. La caracterización fisicoquímica y microbiológica de estos tipos de agua se realizó de acuerdo con las Normas Oficiales Mexicanas.

El material utilizado durante toda la fase experimental es el común de laboratorio, en cuanto al equipo es el siguiente:

#### Equipo

- Nefelómetro modelo TAI Monitec (0 – 200 UTN)
- Nefelómetro Scientific, Inc, FortMyers Micro 100 (0.02 – 1000 UTN)
- Prueba de jarras Phipps y Bird Inc. Modelo No. 30
- Contador de tamaño de partículas Coulter Small Volume Module Plus LS230

- Software AdquiData-UAEM (Ilagorre y Rivas, 2002)

### 3.1.2. Obtención de los parámetros que afectan las operaciones unitarias de coagulación-floculación-sedimentación (prueba de jarras)

Una vez que la planta se terminó de construir y ya ubicada en el CIRA, se procedió a obtener las características físicas y con un gasto de 0.0005 m<sup>3</sup>/s obtener a través de cálculos los gradientes y tiempos de cada una de las operaciones de coagulación-floculación y sedimentación (Memoria de cálculo, anexo II).

De acuerdo con los resultados obtenidos en la memoria de cálculo, se establecieron las condiciones de gradientes y tiempos para los ensayos en prueba de jarras (tabla 3.1), donde se observan dos etapas para la unidad de floculación, esto es debido a la geometría de la planta potabilizadora, ya que por el cambio de áreas se presenta variación en los gradientes de velocidad, mismos que se deben representar en pruebas de jarras, los parámetros serán: dosis óptima de coagulación, pH óptimo de coagulación, tamaño de flóculo y el uso de ayuda coagulantes. Para evaluar estos parámetros se empleó la siguiente metodología.

**Tabla 3.1. Condiciones de mezclado para las pruebas de jarras con base en las dimensiones de la planta piloto**

	<b>Velocidad</b> (r.p.m.)	<b>Tiempo</b> (s)
Mezcla rápida	100	5
Mezcla lenta	80	60
	40	300
Sedimentación	0	600

#### 3.1.2.1. Determinación de la dosis óptima de coagulante

Se determinó la dosis óptima de coagulante utilizando los coagulantes sulfato de aluminio grado industrial Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>.18 H<sub>2</sub>O, cloruro férrico grado industrial FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O, y POVIMAL® CPL (hidroxicloruro de aluminio) en dosis de 5 a 70 mg/L.

Como polielectrólitos: NALCO® 8100, NALCO® 8103, JORDAFLOC® 555 (JF555) y FL18®. Para los productos químicos de NALCO®, sólo se aplicó hasta una concentración máxima recomendada por el proveedor, debido a la toxicidad que presenta el producto cuando el agua tratada es para consumo humano. En el anexo III se presenta como parte de la propuesta de manual de operación y control de la PPP, la hoja técnica de estos productos (exceptuando los polielectrólitos JF555® y FL18®, ya que el proveedor no los proporcionó). La variable de respuesta evaluada en todos los casos fue la turbiedad residual (UTN).

### 3.1.2.2. Medición del tamaño de flóculo formado

Se determinó el tamaño de flóculo producido, y se evaluaron sus características cualitativamente, de acuerdo con el índice de Willcomb (Arboleda, 1993), tabla 3.2. Se escoge la dosis óptima de la jarra que presenta la partícula de mayor tamaño, aunque no siempre el mayor tamaño de partícula produce la mayor velocidad de sedimentación aparente. Se considera una prueba muy subjetiva, ya que depende del criterio del observador.

**Tabla 3.2. Valores del índice de Willcomb.**

Valor	Descripción	Tamaño del flóculo (mm)
0	<b>Flóculo coloidal.</b> Ningún signo de aglutinación.	< 0.5
2	<b>Visible.</b> Flóculo muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado.	0.5 – 0.75
4	<b>Disperso.</b> Flóculo bien formado uniformemente distribuido (sedimenta muy lentamente o no sedimenta).	0.75 – 1.0
6	<b>Claro.</b> Flóculo de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud	1.0 – 1.5
8	<b>Bueno.</b> Flóculo que se deposita fácil pero no completamente.	1.5 – 2.25
10	<b>Excelente.</b> Flóculo que se deposita todo, dejando el agua cristalina.	2.25 – 4.0

Fuente: Modificado de Arboleda (1993) y Ritcher (1993).

### **3.1.2.3. Determinación del pH óptimo de coagulación-floculación**

El pH óptimo de coagulación se determinó aplicando la dosis óptima de coagulantes variando el pH con ácido clorhídrico o hidróxido de sodio (0.1N) entre 3 y 11 unidades antes de aplicar el coagulante. Al finalizar la prueba, se tomó lectura de la turbiedad residual y el pH, evaluando así su efecto.

Investigadores como Stum y O'Melia (1968) en estudios de la etapa de coagulación, han demostrado que la dosis óptima de coagulante varía en función del pH, mismo que en recientes trabajos (Amirtharajah, 1996, Krasner. S., *et al.*, 1995, Gray K., *et al.*, 1995) se ha corroborado.

### **3.1.2.4. Determinación del ayudante de coagulación-floculación**

Una vez determinada la dosis óptima de coagulante, se realizó la prueba de jarras para determinación de la dosis óptima de ayudante de coagulación; con la única variante, de adicionar el ayudante de coagulación posterior al coagulante primario, en un lapso de tiempo no mayor de 20 s (Arboleda, 1993). En este estudio se aplicaron dosis de entre 0.1 y 0.3 mg/L de polímero, recomendado por Grozes *et al.*, (1995) aplicada a casos en los que la turbiedad es baja (2.5 a 50 UTN).

Como ayudantes de coagulación, fueron empleados: Vafloc®, Nalco® 8100, Nalco® 8103, mucílago de nopal, FL18®, JF555 y povimal® y cloruro férrico (aplicado éste último cuando se utiliza povimal® como coagulante primario) considerando como coagulantes primarios al cloruro férrico y al sulfato de aluminio y utilizando en las aguas tipo 2 y 3.

### 3.1.3. Caracterización del medio filtrante

Se determinó para el medio filtrante el coeficiente de uniformidad, el tamaño efectivo y peso específico de acuerdo con la siguiente metodología:

#### 3.1.3.1. Granulometría de la arena sílica del medio filtrante (Arboleda, 1993)

Para determinar el coeficiente de uniformidad se procedió de la siguiente manera:

- a) Se tomó una muestra de medio filtrante y se secó a 100 °C durante 24 horas.
- b) Se pesó (200 a 250 g) y se colocó en la serie de tamices seleccionados.
- c) Se sometieron a vibración intensa por medio de sistema mecánico
- d) Se extrajo el contenido de cada malla y se pesó anotando el número de tamiz y el tamaño de la abertura.

De acuerdo con la ecuación 3.1 se expresa el coeficiente de uniformidad.

$$\text{Coeficiente de uniformidad} = D_{60}/D_{10} \dots\dots\dots(3.1)$$

Donde:

$D_{10}$  = diámetro efectivo a tamaño 10%

$D_{60}$  = diámetro efectivo a tamaño 60%

#### 3.1.3.2. Peso específico de la arena sílica del medio filtrante

La determinación del peso específico de una muestra de medio granular se determina de la siguiente manera:

- Secar la muestra del medio filtrante durante 24 h a 103 °C.
- Pesar 150 g de muestra y colocarla en un vaso de precipitado de 400 mL.
- Añadir 100 mL de agua y hervir durante 5 minutos a fin de expulsar el aire
- Pesar un matraz desecado de 250 mL.

- Enfriar y llevar la muestra a este matraz más la muestra del lecho filtrante completar hasta el aforo.
- Pesar el matraz más el agua y el lecho filtrante.
- El peso específico será igual a: ecuación (3.2).

$$S = \text{Peso de la muestra (150g)} / \text{Volumen de la muestra.....(3.2)}$$

Donde

El volumen de la muestra es igual a volumen de la muestra más el volumen del agua (250mL), restándole el volumen del agua desplazada.

### **3.2. Determinación de los parámetros teóricos de diseño y operación**

#### **3.2.1. Comportamiento de la velocidad de flujo con respecto a la zona de cambio de área del sistema**

Para conocer el comportamiento en el cambio de áreas y velocidades dentro del sistema, se calculó la velocidad del sistema en función del área tomando como punto de referencia la zona de recirculación del manto de lodo (tolva inferior), posteriormente la zona de formación del manto de lodo y concluyendo en la etapa de clarificación, en la cual la velocidad se torna constante, esto se realizó para un gasto de 0.0005 m<sup>3</sup>/s.

#### **3.2.2. Cálculo de los parámetros de diseño de cada operación unitaria de la planta.**

Para realizar los cálculos teóricos se consideró un gasto de 0.0005 m<sup>3</sup>/s, Se calculó el área de la sección transversal (a), el régimen de turbulencia de acuerdo con el número de Reynolds (Re), el factor de fricción ( $f_D$ ), la pérdida de carga ( $h_L$ ), la potencia disipada (P), el gradiente de velocidad (G) y el número de Camp (C); para cada unidad con la que cuenta la planta (operación unitaria). La operación óptima de

la mezcla rápida y floculación se determinó con el producto de  $G \cdot C$  y la sedimentación con el producto de  $G \cdot C \cdot \theta$ , donde  $C$  es la concentración del lodo formado ( $m^3/m^3$ ). Lo anterior se realizó de acuerdo con las siguientes ecuaciones.

Con las ecuaciones 3.3 y 3.4 se determinó el área de sección transversal y el diámetro equivalente. Donde  $a$  es, el área libre de la tubería o sección, en  $m^2$ ;  $D$  es, diámetro de la tubería en  $m$ ,  $D_e$  es el diámetro equivalente en  $m$  que corresponde al diámetro real de figuras concéntricas, los subíndices  $a_M$  y  $a_m$ , son área o mayor; y área o menor; respectivamente.

$$a = \pi (D/2)^2 \dots\dots\dots (3.3)$$

$$D_e = [(a_M - a_m)^{1/2} / \pi] [2] \dots\dots\dots (3.4)$$

Para el volumen se consideraron las diferentes alturas, multiplicadas por el área ya determinada.

Como paso siguiente y con el fin de determinar el gradiente de velocidad y número de Camp; se calcularon las condiciones de turbulencia de acuerdo con el número de Reynolds, para cada una de las secciones.

Se usó la ecuación 3.5, para determinar el número de Reynolds; ( $Re$ ), donde:  $v$  es la velocidad en  $m/s$ ,  $D$  es el diámetro de la tubería, en  $m$ ,  $\rho_{Mez}$  es la densidad de la mezcla en  $kg/m^3$ ,  $\mu_{Mez}$  es la viscosidad de la mezcla en  $kg/m s$ , éstos últimos son valores experimentales obtenidos en estudios previos según el coagulante utilizado.

$$Re = v D \rho_{Mez} / \mu_{Mez} \dots\dots\dots (3.5)$$

Conociendo las condiciones de turbulencia, se buscó calcular la pérdida de carga para cada sección, considerando el coeficiente de fricción ( $e/D$ ) de la gráfica del apéndice XXV, contenida en Crane, 1982, y Valiente, 2000). El coeficiente  $f_D$  permite determinar la pérdida de carga en el caso de una tubería de diámetro constante  $D$  en ( $m$ ), mediante la siguiente ecuación (3.6), donde  $h_L$  es la pérdida de carga en  $m$ ,  $L$ ,

es la longitud, en m; y g es la aceleración de la gravedad, en m/s<sup>2</sup>. Cabe mencionar que para cada operación unitaria se calculará su pérdida de carga, obteniéndose la pérdida de carga total del sistema.

$$h_L = (f_D v^2 L) / 2 g D \dots\dots\dots(3.6)$$

Sin embargo, en caso de existir una reducción o ensanchamiento súbito del diámetro de la tubería, se requiere calcular la pérdida de carga de la siguiente forma ecuación (3.7); donde  $k_{cb}$  es una constante adimensional de reducción o ensanchamiento, cuyo valor es de 1 si el área es constante.

$$h_L = k_{cb} v^2 / 2 g \dots\dots\dots(3.7)$$

Por otra parte, si existe reducción la constante  $k_{cb}$  se transforma en  $k_{re}$  (ecuaciones 3.8 y 3.9), y si hay ensanchamiento  $k_{cb}$  se transforma en  $k_{ex}$  ecuaciones 3.10 y 3.11, ambas están en función del ángulo de reducción o ensanchamiento ( $\alpha$ ) el cual está dado en grados.

$$\alpha \geq 45^\circ \quad C_{re} = 1.6 \text{ sen } (\alpha / 2) \dots\dots\dots(3.8)$$

$$k_{re} = 0.5 (C_{re} - (D_m^2 / D_M^2)) \dots\dots\dots(3.9)$$

$$\alpha \geq 45^\circ \quad C_{ex} = 2.6 \text{ sen } (\alpha / 2) \dots\dots\dots(3.10)$$

$$k_{ex} = C_{ex} - (D_m^2 / D_M^2)^2 \dots\dots\dots(3.11)$$

Donde:  $C_{ex}$  es un coeficiente de expansión,  $C_{re}$  es el factor de reducción,  $D_m$  es el diámetro menor en m y  $D_M$  es el diámetro mayor, en m. (Valiente, 1998)

Una vez que se ha calculado la pérdida de carga se puede determinar, cual sería la pérdida de carga debida a la presencia de sólidos en el fluido, ésta se calcula mediante la ecuación (3.12);  $h_{lod}$ , es la pérdida de carga debida a la presencia de sólidos, en m; c es, la concentración de sólidos en la corriente, en m<sup>3</sup> de lodo/m<sup>3</sup> de muestra;  $\rho_{lodo}$  es la densidad de los sólidos, en kg/m<sup>3</sup> y  $\rho_{agua}$  es la densidad del líquido, en kg/m<sup>3</sup>.

$$h_{lod} = h_L \pm (c ((\rho_{lodo} / \rho_{agua}) - 1) + 1) L \dots \dots \dots (3.12)$$

Donde el signo (+) indica un flujo ascendente y el signo (-) indica un flujo descendente.

Una vez conocida la pérdida de carga, se calcula la potencia disipada aplicando la ecuación 3.13, donde v es la velocidad, en m/s; P es potencia en N m/s,  $\gamma_{agua}$  peso específico del agua, en kg/m<sup>2</sup>·s<sup>2</sup>, h<sub>L</sub> pérdida de carga, en m; y V volumen, m<sup>3</sup>, ya que la potencia está referida a unidad de volumen.

$$P = \gamma_{agua} Q h_L / V \dots \dots \dots (3.13)$$

El cálculo del gradiente se realizó mediante la ecuación (3.14); donde G es el gradiente en s<sup>-1</sup> y  $\mu_{agua}$  es la viscosidad del agua kg/m·s.

$$G = (P / \mu_{agua})^{1/2} \dots \dots \dots (3.14)$$

El tiempo de residencia  $\theta$  se calcula con la ecuación 3.15.

$$\theta = V/Q \dots \dots \dots (3.15)$$

Finalmente, el número de Camp (C) adimensional se cuantifica con la ecuación 3.16.

$$C = G \theta \dots \dots \dots (3.16)$$

### 3.3. Procedimiento experimental II. (pruebas en la planta potabilizadora piloto PPP)

#### 3.3.1. Evaluación del caudal a través de la altura del chorro ascendente

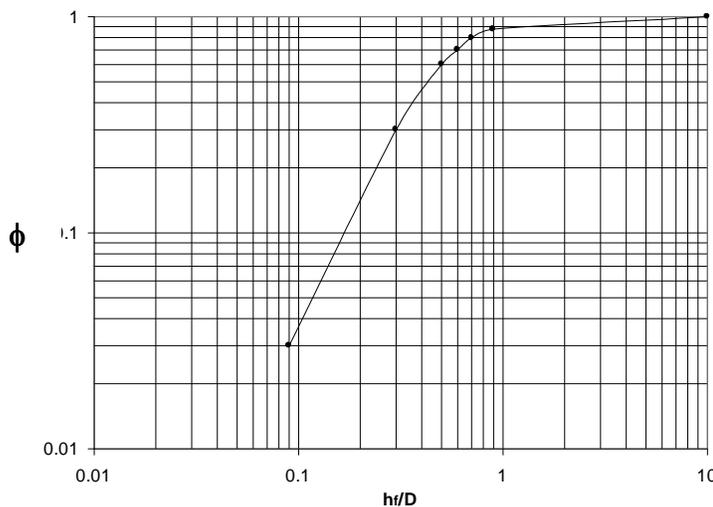
Al inicio de las pruebas en planta no se contaba con un rotámetro, por lo que se procedió a evaluar la velocidad del flujo por medio de la altura del chorro (formación

de chorro ascendente) que se creó a la salida de la unidad de mezclado rápido, (final del tubo de 50 mm de diámetro).

El chorro ascendente se forma ya que al ser un área pequeña la velocidad aumenta generando un chorro al terminar el tubo.

La variación de la altura del chorro ascendente se evaluó con respecto al caudal alimentado abriendo o cerrando la válvula de alimentación. En la tabla 3.3 y figura 3.3 se muestran datos experimentales de diversos autores que han sido adaptados por Sotelo (1974), mismos que se utilizaron para calcular el gasto a un diámetro de la tubería de 0.05 m con la medición de la altura alcanzada en el chorro ascendente, aplicando la ecuación 3.17.

**Tabla 3.3. Factor  $\phi$  para determinar el caudal con base en la altura de la fuente.**



$h_f/D$	$\phi$
0.09	0.03
0.3	0.3
0.5	0.6
0.6	0.7
0.7	0.8
0.9	0.877
10	1

**Figura 3.3. Caudal dentro de una tubería de 50 mm de diámetro basada en la altura de la fuente formada.**  
Fuente: Sotelo 1974

$Q^2/g h_f D^4 = \phi$  relación buscada en figura 3.3, despejando el gasto se tiene:

$$Q = ( \phi g h_f D^4 )^{1/2} \dots \dots \dots (3.17)$$

Donde:  $\phi$  es el factor leído de la figura 3.3, factor propuesto por Sotelo (1974) y que se utiliza en la ecuación para determinar el gasto de un chorro ascendente,  $g$  es la aceleración de la gravedad, en  $m/s^2$ ,  $h_f$  es la altura de la fuente, en  $m$ ,  $Q$  es el caudal,  $m^3/s$ , y  $D$  el diámetro de la tubería, en  $m$ .

### **3.3.2. Comportamiento hidráulico de la PPP**

#### **3.3.2.1. Análisis de flujos y factores que determinan el tiempo de retención en la PPP**

Las pruebas con trazadores han sido utilizadas por muchos años como medio para determinar el flujo en canales, ríos o reservorios. En una planta de tratamiento se determina la distribución del flujo en reactores paralelos y se evalúa la eficiencia hidráulica y configuración de unidades de distribución, entrada y recolección de agua y sobre todo para definir los tiempos reales de retención y sus principales características concomitantes: tipo de flujo, espacios muertos y cortos circuitos.

Para realizar estas determinaciones en la planta piloto, se procedió a realizar algunas modificaciones en la misma, éstas básicamente servirán para generar una salida del agua de la planta en diferentes puntos indicando inicio y término de cada una de las operaciones unitarias con las que cuenta la planta (Plano A-06. Cap 1). Las pruebas con trazadores se realizaron aplicando dos metodologías, debido a que por los tiempos de retención en la mezcla rápida y mezcla lenta son muy pequeños y no fue posible determinar con precisión la concentración de trazador a la salida.

#### **Inyección de pulso (1 golpe).**

Se aplica un golpe de concentración  $C_0$  de trazador a la entrada de la planta en el menor tiempo posible, Pérez Carreón (1992) recomienda un tiempo inferior a  $1/30$  del tiempo teórico de retención y un punto tal que se mezcle instantáneamente con la

masa de agua a analizar, se mide la concentración de trazador inyectado a la salida del reactor, en función del tiempo.

**Inyección de escalón positivo.**

Se aplica la concentración  $C_0$  de trazador en forma continua por un tiempo no menor a tres veces del periodo de retención nominal, y luego se interrumpe bruscamente la dosificación. Midiendo a la salida del reactor, la concentración de trazador inyectado, en función del tiempo. (Levenspiel, 1987, Fogler, 2001).

En la tabla 3.4, se muestran los puntos de aplicación del trazador NaCl a concentración de saturación (34 g/L) y los puntos de cuantificación del mismo, así como el volumen aplicado de acuerdo con la etapa de cuantificación para las pruebas de inyección de pulso. En cuanto a las pruebas de inyección en escalón positivo, los puntos de muestreo y cuantificación son los mismos, la inyección se realizó con la bomba para dosificar el coagulante por lo que esta prueba sólo se realizó para la etapa de clarificación, debido a que el tiempo de retención teórico es muy corto para las etapas anteriores.

**Tabla 3.4. Distribución de los puntos de inyección y cuantificación del trazador en la planta piloto para las pruebas de inyección de pulso.**

	<b>Inyección de trazador</b>	<b>Cuantificación del trazador</b>	<b>Volumen (mL) del trazador</b>
Mezcla rápida	Tubería de alimentación	Parte superior de la planta (final de la tubería de 0.05 m) Punto A	20
Mezcla lenta primera etapa	Tubería de alimentación	Parte media de la planta (fin de la tubería de 0.2 m) Punto B	20
Mezcla lenta segunda etapa	Tubería de alimentación	Parte inferior de la tolva superior (inicio de zona de manto de lodo) Punto C	30
Manto de lodo	Parte superior de la planta (inicio de tubería de 0.2 m)	Parte superior de la tolva superior (inicio de zona de clarificación) Punto D	300
Clarificador	Parte superior de la planta (inicio de tubería de 0.2 m)	Parte superior de la planta (fin de la zona de clarificación) Punto E	1000

Para la inyección el trazador en la tubería de alimentación se perforó un orificio el cual se mantenía cerrado con un tapón de hule y a través de ésta, por medio de una jeringa se inyectó el volumen de trazador en una solución saturada de NaCl.

Para ambas metodologías se utilizó el programa AdquiData-UAEM generado en el CIRA para apoyo a mediciones ambientales (Ilagorre y Rivas, 2002). Con el cual se cuantificó la conductividad en los puntos antes señalados en función del tiempo, por medio de un electrodo acoplado a un equipo de adquisición de datos ADC (Remote Measurement Inc.), conectado a su vez a un equipo de cómputo para almacenamiento de los datos.

### 3.3.2.2. Determinación de las pérdidas de carga en la PPP

La prueba consiste en instalar una regla graduada dentro de un reactor para medir el nivel del agua en el mismo. Conectar un piezómetro a la entrada y otro a la tubería de salida. Las miras de los piezómetros deberán nivelarse haciendo coincidir el cero con el nivel máximo del reactor, leer el nivel de agua en ambos puntos  $h_1$  y  $h_2$  (punto medio de las fluctuaciones si las hubiera). La pérdida de carga estará dada por la diferencia de las dos lecturas: Ecuación 3.18

$$h = h_3 - h_4 \dots\dots\dots (3.18)$$

Estas mediciones se deben efectuar con intervalos de una hora durante el proceso en el reactor.

Para la determinación de las pérdidas de carga se colocaron piezómetros en las diferentes zonas de inicio y término de las operaciones unitarias de mezcla rápida, mezcla lenta (dos etapas), sedimentación y en el caso del filtro, se consideraron las alturas de los diferentes materiales con los que cuenta el filtro, esto es colocando cuatro piezómetros a las alturas de 0.27, 0.37, 0.57, y 0.62 m correspondiendo a los medios filtrantes del medio de soporte, gravilla, arena de río y arena sílica respectivamente. Esto se muestra en el plano A-02.

### 3.3.3. Operación de la PPP

Las pruebas en planta consistieron primero en variar el caudal de alimentación, con el fin de observar un equilibrio adecuado entre la velocidad del flujo ascensional y la velocidad de sedimentación de las partículas formadas (flóculos), y la formación del manto de lodo en la zona adecuada. Para esto se utilizaron los coagulantes optimizados en prueba de jarras. (Corwell *et al.*, 1983). En planta se monitoreó la formación del manto de lodo, con el fin de ubicar el aumento en la concentración de sólidos a través de la turbiedad residual.

El muestreo se llevó a cabo en intervalos de 20-60 min, preferentemente, determinando los parámetros de turbiedad del agua y concentración de sólidos (mL/L) en el caso de observar una turbiedad alta. Para efecto de ubicar la formación del manto de lodo, durante una primera etapa de prueba se midió la turbiedad residual en los puntos de muestreo 2, 4, 5 y 14. Una vez que se observó la formación del manto, se optimizó el proceso, con el fin de evaluar con mayor eficacia el funcionamiento de la PPP evaluando los parámetros y puntos de muestreo que se indican en la tabla 3.5 y el plano A-02 capítulo 1.

Así mismo, en las pruebas de mayor duración y estabilidad en el proceso se evaluaron algunas características fisicoquímicas y microbiológicas del agua tratada con respecto al agua cruda. Éstas fueron: color, pH, temperatura, conductividad, turbiedad, alcalinidad, dureza, nitritos, nitratos, sulfatos, cloruros, fosfatos, sólidos totales, sólidos totales fijos, sólidos suspendidos totales, coliformes totales y coliformes fecales, según las Normas Oficiales Mexicanas.

**Tabla 3.5. Descripción de los diferentes puntos de muestreo.**

<b>Punto de muestreo</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Parámetro a evaluar</b>
1	Agua cruda alimentada a la planta	Turbiedad, caracterización fisicoquímica y microbiológica
2	Final de la unidad de mezclado rápido parte superior de la PPP	Turbiedad
3	Primera etapa de la unidad de floculación	Turbiedad
4	Zona inicial de formación del manto de lodo	Turbiedad y sólidos sedimentables
5	90 mm de la zona de inicio del manto de lodo	Turbiedad y sólidos sedimentables
6	180 mm de la zona de inicio del manto de lodo	Turbiedad y sólidos sedimentables
7	270 mm de la zona de inicio del manto de lodo	Turbiedad y sólidos sedimentables
8	360 mm de la zona de inicio del manto de lodo	Turbiedad y sólidos sedimentables
9	450 mm de la zona de inicio del manto de lodo	Turbiedad y sólidos sedimentables
10	150 mm zona de clarificación	Turbiedad
11	300 mm zona de clarificación	Turbiedad
12	600 mm zona de clarificación	Turbiedad
13	900 mm zona de clarificación	Turbiedad
14	Salida de la unidad de clarificación	Turbiedad
15	Salida de la unidad de filtración	Turbiedad
16	Salida de la unidad de desinfección	Turbiedad, caracterización fisicoquímica y microbiológica, cloro residual.

Nota: Los puntos de muestreo se evaluaron en función de la prueba a realizar

### **3.3.3.1. Evaluación de las características de los flóculos que forman el manto de lodo.**

Una vez realizada la primera etapa de la PPP, concerniente al control del proceso de coagulación-floculación-sedimentación, y la formación del manto de lodo, que permitiera la recuperación de una cantidad adecuada de lodo; se analizaron las características siguientes del mismo; velocidad de sedimentación, tamaño de flóculo (de acuerdo al índice de Willcomb), cohesión de lodo, densidad de lodo decantado, sólidos totales y gravedad específica del lodo. El lodo obtenido en planta proviene de

agua tipo 3 aplicando los coagulantes cloruro férrico e hidroxiclорuro de aluminio en dosis de 15 y 5 mg/L respectivamente.

**Velocidad de sedimentación.**

Con un volumen de 2 L de lodo obtenido de la PPP en la unidad del manto de lodo, se llevó a cabo, esta prueba, la cual consistió en registrar la variación de volumen aparente de partículas en función del tiempo hasta 600 s; (tiempo de sedimentación). Con estos datos se realizó un promedio de las lecturas aplicando las ecuaciones 3.19 y 3.20 considerando una sedimentación por compresión o barrido. (Arboleda, 1974, Tambo *et al.*, 1979).  $v_s$  es la velocidad de sedimentación, en m/s,  $v_{Sep}$  es la velocidad de sedimentación promedio, en m/s,  $H_i$  y  $H_f$ , son las alturas inicial y final, en m,  $\theta$  es el tiempo, en s y  $n$  es el número de observaciones.

$$v_s = (H_i - H_f) / \theta \dots \dots \dots (3.19)$$

$$v_{Sep} = \sum_{1}^n v_s / n \dots \dots \dots (3.20)$$

**Tamaño de flóculo.**

Este se midió de acuerdo con el índice de Willcomb, esta técnica es de forma visual que de acuerdo con el tamaño de flóculo y con los efectos de éste se le asigna un valor de acuerdo con la tabla 3.2. Así mismo, se utilizó la ley de Stokes para determinar el diámetro equivalente para una partícula esférica. Ecuación 3.21 (Arboleda, 1993). Donde:  $D_{par}$  es el diámetro de la partícula, en m;  $g$  es la aceleración de la gravedad, en  $m/s^2$ ;  $\mu_{agua}$  es la viscosidad del agua, en  $kg/ms$ ,  $\rho_{lodo}$  es la densidad de los lodos, en  $kg/m^3$  y  $\rho_l$  es la densidad del líquido, en  $kg/m^3$ .

$$v_s = g D_{par}^2 ( \rho_{lodo} - \rho_l ) / 18 \mu_{agua} \dots \dots \dots (3.21)$$

**Constante de cohesión de lodos.**

Se colocó en una probeta de 250 mL lodo obtenido de las pruebas en planta. Se dejó en reposo durante 10 minutos y se extrajo el exceso de lodos, de modo que quede en la probeta un volumen aparente de lodos de 50 mL (Degremont, 1979).

Se introdujo en la probeta, un embudo de vástago alargado sumergido de tal forma que la punta se encontrase en el centro y a una profundidad de 10 mm del fondo; a continuación, se agregó el agua decantada, a través del embudo proveniente de los mismos ensayos (para evitar el cambio de pH u otras características), de tal forma que no existiese arrastre de burbujas, la adición del agua debió ser discontinua y en pequeñas cantidades, dejando que se desbordase el exceso del líquido por la parte superior de la probeta.

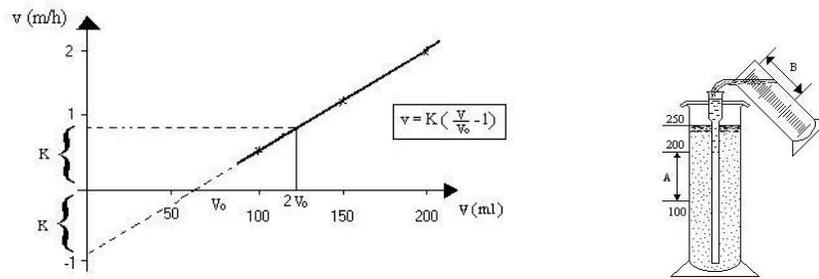
Con esto se produjo la expansión del lodo, determinándose la velocidad de flujo ascensional del agua que corresponde a diferentes estados de expansión del mismo.

Se midió el tiempo  $\theta$  en, s, que corresponde a la introducción de 100 mL de agua para volúmenes aparentes  $V$  en mL del fango de 100, 150, 200 y 250 (Ecuación 3.22), donde  $H$  es la altura en mm de la probeta para 100 mL y  $v$  es la velocidad ascensional en m/h.

$$v = 3.6 H / \theta \dots\dots\dots(3.22)$$

Los datos obtenidos del ensayo se representan gráficamente tomando la velocidad ascensional necesaria para alcanzar al volumen  $V$  como ordenada y  $V_0$  volumen aparente de fango en expansión como abscisas. Ecuación. 3.23. En la figura 3.4. se muestra la probeta para realizar la determinación, así como la gráfica para determinar el coeficiente de cohesión de lodo.

$$v = K (V / V_0 - 1) \dots\dots\dots(3.23)$$



**Figura 3.4. Probeta y gráfico utilizado para determinar el coeficiente de cohesión de lodo (Fuente: Degremont, 1979).**

Para un lodo bien constituido, de sedimentación rápida, K (que indica que tan fuerte es la unión entre las partículas de lodo) tiene valores de 0.8 - 1.2 y un flóculo frágil, ligero y con exceso de agua menor o igual a 0.5 (Degremont, 1979).

### Densidad de lodo decantado

La densidad del lodo decantado se calculó mediante la medición de un volumen de lodos, 200 mL y posteriormente se pesó la muestra; después de haber pesado el receptáculo; se mide la diferencia de pesos y ésta se divide entre el volumen de la muestra (ecuación 3.24). Así mismo, con las ecuaciones 3.25 y 3.26 se obtiene la fracción de sólidos en la muestra y la densidad de sólidos. Entre mayor sea el volumen de estudio, menor es el error al determinar la densidad de los sólidos suspendidos. Donde:  $\rho_{\text{lodo}}$  es la densidad de los lodos,  $\text{kg/m}^3$ ,  $\rho_{\text{Sól}}$  es la densidad de los sólidos,  $\text{kg/m}^3$ ,  $M_{\text{lodo}}$  es la masa del lodo,  $\text{kg}$ ,  $M_{\text{Sól}}$  es la masa de sólidos,  $\text{kg}$ ,  $M_{\text{Tot}}$  es la masa total,  $\text{kg}$ ,  $V_{\text{Es}}$  es el volumen de referencia,  $\text{m}^3$  ( $0.01 \text{ m}^3$ ),  $X_{\text{Sól}}$  es la fracción de sólidos en la muestra  $\text{kg/kg}$  y  $X_{\text{agua}}$  es la fracción de agua en la muestra  $\text{kg/kg}$ .

$$\rho_{\text{lodo}} = M_{\text{lodo}} / V_{\text{Es}} \dots \dots \dots (3.24)$$

$$X_{\text{Sól}} = M_{\text{Sól}} / M_{\text{Tot}} \dots \dots \dots (3.25)$$

$$\rho_{\text{Sól}} = ( ( M_{\text{Tot}} / V_{\text{Es}} ) - ( \rho_{\text{agua}} \times X_{\text{agua}} ) ) / X_{\text{Sól}} \dots \dots \dots (3.26)$$

**Sólidos sedimentables**

Se evaluó con respecto al volumen de referencia ( $V_{\text{Es}}$ ) de 10 mL de agua, que se obtiene de los puntos de muestreo 4 al 7 correspondientes al área de formación del manto de lodo. Este fue colocado en un tubo de ensaye de fondo cónico, midiendo el volumen de lodo después de 30 minutos. De acuerdo a la ecuación 3.27 se obtuvo el valor de sólidos sedimentables donde  $S_{\text{se}}$  son los sólidos sedimentables en mL/L,  $V_{\text{lodo}}$  es el volumen de lodos generados  $\text{m}^3$  y. Bache *et al.*, (2001), en su metodología propone una prueba considerando un volumen de 100 mL, sin embargo, por el poco volumen de lodo obtenido en las pruebas de planta, se consideró un volumen menor de 10mL. método modificado de APHA (met. 2540F)

$$S_{\text{se}} = V_{\text{lodo}} / V_{\text{Es}} \dots \dots \dots (3.27)$$

**Sólidos suspendidos**

Un volumen de 100 mL del lodo obtenido en la zona de manto de lodo se llevó a filtración y posteriormente se secó a 100 °C durante 24 horas. Aplicando la ecuación 3.28 se obtienen los sólidos suspendidos totales (en g/L); (APHA, AWWA,1992 método 2540D).  $S_{\text{Su}}$  son los sólidos suspendidos en g/L

$$S_{\text{Su}} = M_{\text{lodo}} / V_{\text{Es}} \dots \dots \dots (3.28)$$

**Gravedad específica del lodo**

La gravedad específica, es la relación entre la masa, a volúmenes iguales, de lodo y agua destilada. Para determinarla, se tomó una muestra de 200 mL de lodo homogéneo de la zona de formación del manto de lodo a temperatura ambiente; se comparó con la masa del mismo volumen de agua destilada a 4°C; (APHA,

AWWA,1992 método 2710F). (Ecuación 3.29). donde:  $\gamma_{\text{lodo}}$  es la gravedad específica del lodo adimensional y  $M_{\text{ad } 4^{\circ}\text{C}}$  es la masa agua destilada a 4°C, kg

$$\gamma_{\text{lodo}} = ( M_{\text{lodo}} / V_{\text{ocupado}} ) / ( M_{\text{ad } 4^{\circ}\text{C}} / V_{\text{Es}} ) \dots\dots\dots(3.29)$$

**Viscosidad de los lodos.**

Para determinar la viscosidad de suspensiones coloidales Valiente (1998), presenta las siguientes ecuaciones para suspensiones diluidas fase sólida menor del 10% (Ecuaciones 3.30 y 3.31). Donde: c es la concentración de sólidos en suspensión, m<sup>3</sup> de volumen fase sólida /m<sup>3</sup> de volumen total,  $\mu_{\text{lod}}$  es la viscosidad del lodo kg/m·s y  $\mu_{\text{agua}}$  es la viscosidad del agua kg/m·s.

$$\mu_{\text{lod}} = \mu_{\text{agua}} (1+2.5 c) \dots\dots\dots(3.30)$$

Para fase sólida hasta 30% en volumen:

$$\mu_{\text{lod}} = \mu_{\text{agua}} (0.59/(0.77- c)^2) \dots\dots\dots(3.31)$$

**Determinación de los elementos aluminio y hierro contenidos en el lodo.**

Se realizó digestión del lodo para su lectura en absorción atómica utilizando el equipo marca Varian.

**3.3.4. Pruebas de filtración en la PPP**

**3.3.4.1. Evaluación de la tasa de filtración**

Esta prueba se realizó con el fin de determinar la tasa de la unidad de filtración. La prueba consistió en colocar una regla dentro del filtro, cerrar la válvula de ingreso del influente, medir el tiempo ( $\theta_f$ ) en segundos, necesario para que el nivel del agua baje una marca de la regla a la siguiente, una distancia de 20 cm, repetir varias veces la medición y promediar los valores de ( $\theta_f$ ) y finalmente calcular la velocidad de filtración

mediante la ecuación 3.32, modificada de Pérez y Cánepa (1992).  $v_f$  es la velocidad de filtración ( $m^3 / m^2d$ )

$$(3.32) \quad v_f \text{ (m/d)} = \frac{0.20 \text{ m}}{\theta_f \dots\dots\dots}$$

### 3.3.4.2. Expansión del lecho filtrante

El objetivo de ésta prueba es determinar el porcentaje de aumento del espesor del lecho filtrante durante la operación de lavado.

#### Procedimiento

- A una varilla, se le soldaron tapas metálicas de botella cada 5 cm. Al dejarla fija encima del lecho, las tapas que se llenaron de arena durante el lavado, hasta la altura correspondiente a la que haya subido el lecho indican la expansión del mismo una vez que se suspende el lavado, se mide la distancia entre la tapa más alta que se encuentra con arena y la superficie del medio filtrante.

Cuando se utiliza dicho método, el lavado deber ser iniciado muy lentamente, para que los chorros fuertes de agua no hagan subir la arena y no penetre en tapas más altas, evitándose así falsos resultados.

### 3.3.4.3. Lavado del lecho filtrante

Tiene como objetivo conocer la forma de cómo varía la turbiedad del agua de lavado en el filtro, a fin de determinar el tiempo óptimo en que debe llevarse a cabo dicha operación.

#### Procedimiento

- Se prepararon 15 frascos de 150 mL de volumen y numérelos del 1 al 15.

- Se inició el lavado normal del filtro y tan pronto como caiga la primera agua de lavado en la canaleta, se llenaron los frascos cada minuto hasta completar los quince.
- Se determinó la turbiedad de cada muestra y se dibujó una curva en papel logarítmico (3 ciclos) con los valores obtenidos.

Obsérvese en la curva el punto de inflexión inferior en donde ésta tiende a ser asintótica con respecto al eje horizontal. Márquese ese punto y léase el tiempo, que corresponderá al óptimo de lavado a partir del cual, aunque el tiempo se prolongara, no se ganarían mejores resultados.

### **3.3.5. Metodología de las pruebas en la PPP para diferentes tipos de agua**

De acuerdo con lo descrito en el apartado 3.2.5. y en cuanto a la puesta en marcha de la planta se trabajó de diferente manera de acuerdo con el tipo de agua en estudio.

Así para el agua tipo 1 las operaciones unitarias utilizadas fueron la filtración y la desinfección obteniendo el agua de alimentación directamente del tanque elevado del laboratorio de modelos hidráulicos, lo que implicó que el agua de entrada se alimentara por carga hidráulica ya que existe una conexión entre el tanque elevado y la planta potabilizadora.

En este caso se evaluó la turbiedad a la salida del filtro. También se evaluó la producción de cloro residual en el agua de salida. Se realizó una caracterización general del agua evaluando algunos de los parámetros indicados por la norma de agua para uso y consumo humano como son: parámetros fisicoquímicos (alcalinidad, dureza, nitratos, nitritos, fosfatos, sólidos totales fijos y volátiles, sólidos suspendidos totales) y microbiológicos (coliformes fecales y totales) a fin de evaluar la eficiencia del tratamiento. (NOM127-SSA1-1994).

Para evaluar el comportamiento de la celda solar, es decir, la producción de gas cloro *in situ* se realizaron determinaciones de cloro residual y como cloro total en el agua de salida de la PPP (punto de muestreo 16) durante el periodo de prueba.

El cloro residual fue medido al momento de muestreo (considerado como 0 minutos) y posteriormente en la misma muestra después de 30 minutos para evaluar el cloro residual presente después de un tiempo de la aplicación de gas cloro. (Hach y Normas Mexicanas). Igualmente se determinaron temperaturas y voltaje durante las pruebas de acuerdo con Brust- Carmona (1996).

Para las pruebas con agua tipo 2 y tipo 3 se analizaron las operaciones unitarias de coagulación-floculación, sedimentación filtración y desinfección. Las primeras pruebas se realizaron por tiempos cortos con el fin de analizar gastos de alimentación tanto del agua como del producto químico a través de las bombas de alimentación y dosificadora respectivamente.

Al aumentar el tiempo de operación de la planta, se evaluó la formación del manto de lodo de acuerdo con el coagulante empleado, ya que aún cuando los ensayos en prueba de jarras indicaban los posibles coagulantes a utilizar y las dosis adecuadas era importante la evaluación en la planta piloto considerando todas las variables en juego como son: caudal de operación (de agua y de coagulante), tiempos por operación unitaria, tipo de agua, turbiedad, formación del manto de lodo, entre otras.

En estas primeras pruebas no se instaló el medio filtrante, con el fin de evitar problemas de colmatación del mismo.

Una vez obtenidos los parámetros de operación de las primeras etapas y con las modificaciones realizadas al sistema, se procedió a realizar pruebas con el sistema completo, tratando de alcanzar por lo menos 8 horas de trabajo continuo.

Evaluando a través de algunos parámetros, la calidad del agua a la entrada y a la salida de acuerdo con la norma de agua para uso y consumo humano. NOM 127-SSA1-1994.

Durante las pruebas realizadas en planta fue necesario la alimentación continua de agua sintética misma que se prepara en un sedimentador horizontal de la planta de tratamiento de agua residual de las instalaciones del CIRA, y que se mantiene en agitación por medio de una bomba que recicla el líquido, y es alimentada a la cisterna de la PPP, que a su vez alimenta la planta potabilizadora, por lo que la turbiedad de entrada es variable, pero considerada como cercana al agua tipo 2 y 3 como se manejó al inicio del trabajo, se cuenta con análisis de esta agua como una muestra compuesta del tiempo que dura una prueba en planta.

Los puntos de muestreo indicados en la tabla 3.3, no se cuantificaron en su totalidad en todas las pruebas, por lo tanto en los resultados se indicarán los puntos cuantificados para cada corrida en planta.

### **Estudio de la formación del manto de lodo con el agua tipo 3.**

Con el fin de evaluar de manera eficiente la formación del manto de lodo con las condiciones más drásticas (agua tipo 3), en una prueba completa se determinó para los coagulantes cloruro férrico y povimal la concentración de sólidos sedimentables (mL/10mL) y la turbiedad residual en la zona de formación del manto de lodo puntos de muestreo del 4 al 7 (principalmente), así como turbiedad residual a la salida del clarificador y después de la etapa de filtración. En cuanto a la evaluación microbiológica se determinaron coliformes totales y fecales cada hora por 5 horas en muestras puntuales.

### **3.3.6. Tren de tratamiento para los diferentes tipos de agua a tratar.**

Para concluir de acuerdo a los resultados se esquematiza con un tren de tratamiento las operaciones aplicadas por tipo de agua experimentada en este trabajo.

## Capítulo 4. Resultados y discusión

### 4.1. Procedimiento experimental I (pruebas en el laboratorio)

#### 4.1.1. Caracterización de los diferentes tipos de agua empleados en la experimentación

En la tabla 4.1. se muestran los resultados de la caracterización de los tres tipos de agua, utilizados en los ensayos realizados en pruebas de jarras. Se puede observar que el agua de tipo 1, presenta contaminación debida a microorganismos superando los límites máximos permisibles establecidos en la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 para agua de uso y consumo humano. Sin embargo los otros parámetros analizados se encuentran dentro de normatividad. En cuanto a los tipos de agua 2 y 3, los parámetros fuera de norma son la turbiedad, el color y los coliformes totales y fecales, es importante considerar que la forma de realizar la determinación de organismos coliformes conforme a la normatividad vigente es de forma cualitativa debido a que se determinan con base en una técnica probabilística, (Técnica del Número más Probable) que en este caso se realizó con tres tubos, por lo que se reporta como menor a un número más probable.

En el agua tipo 2, la caracterización indica presencia de color (101 unidades Pt/Co), la turbiedad está entre 35 y 40 UTN. Los sulfatos se incrementan en comparación con el agua tipo 1, lo cual es debido probablemente a la permanencia del agua en la cisterna o al uso de ésta en el laboratorio de modelos hidráulicos. Se aplicarán las operaciones de coagulación–floculación.

El agua tipo 3 los parámetros color (1485 U Pt/Co), turbiedad (200 a 240 UTN), coliformes totales y fecales (900 y <300 respectivamente NMP/100mL) se encuentran por arriba de la norma, por lo que el tratamiento debe de incluir además el proceso de coagulación-floculación.

**Tabla 4.1. Caracterización de los tipos de aguas estudiadas**

Parámetro	Agua tipo 1	Agua tipo 2	Agua tipo 3	Límites permisibles NOM127-SSA1-1994
Temperatura (° C)	16	9	16	N.A.
pH (unidades de pH)	7.9	7.9	6.8	6.5 – 8-5
Color Pt/Co	15	101	1485	20
Turbiedad (UTN)*	4.1- 6.3**	35 – 40	200 -240	5
Sólidos disueltos totales	94	402	226	1000
Nitritos	0.05	0.001	0.05	0.05
Nitratos	1.8	0.1	2.05	10
Oxígeno disuelto	7.13	N.D	N.D	N.A.
Dureza	141.2	171.13	114.64	500
Alcalinidad	167.3	217.5	168	N.A.
Sulfatos	1	16.3	<0.5	400
Coliformes totales NMP/100mL	15	70	900	0
Coliformes fecales NMP/100mL	< 3	< 3	< 300	0

Nota : todos los datos están en mg/L a menos que se especifiquen otras unidades

N.A. no aplica N.D No determinado. \* Intervalo de turbiedad residual en las diferentes pruebas corridas en laboratorio y planta. \*\* Variación natural debida quizá al almacenamiento

#### 4.1.2. Obtención de los parámetros que afectan las operaciones unitarias de coagulación-floculación-sedimentación (prueba de jarras)

##### 4.1.2.1. Determinación de la dosis óptima de coagulante y medición del tamaño de flóculo formado

Las pruebas para la determinación de dosis óptima de coagulante (para los tres tipos de agua), se realizaron bajo las condiciones de mezclado de la planta, (memoria de cálculo anexo II) mezcla rápida, 100 r.p.m., 5 s; floculación, 80 r.p.m., 60 s; en su primera etapa y 40 r.p.m., 300 s en su segunda etapa; y sedimentación, 0 r.p.m., 600 s; y pH inicial, el del agua natural entre 6.8 y 7.9 de acuerdo al tipo de de agua de estudio.

### **Para agua tipo 1.**

En el caso del agua tipo 1, no se aplican coagulantes debido a la baja turbiedad que presenta, ya que al adicionar el producto químico se incrementa la turbiedad residual, por lo que ésta será sometida a las últimas operaciones unitarias en la planta piloto, que son la filtración y la desinfección, mismas que se discutirán en el apartado de pruebas en planta.

### **Para el agua tipo 2.**

En la tabla 4.2. y la figura 4.1. se presentan los resultados de turbiedad residual aplicando las condiciones de mezclado de la planta para los distintos tipos de coagulante utilizados. El agua presentó una turbiedad inicial entre 37 y 40 UTN, observándose como mejores dosis de aplicación las siguientes: para sulfato de aluminio a partir de 10 mg/L se presentan turbiedades inferiores a 10 UTN, para cloruro férrico se obtiene una turbiedad residual menor a 10 UTN entre 10 y 50 mg/L, para Nalco 8100 20 mg/L y para Nalco 8103 entre 25 y 30 mg/L, sin embargo la turbiedad residual mínima para los dos últimos coagulantes, se encuentra por arriba de 10 UTN (14 y 10.6 respectivamente). En el caso del cloruro férrico donde se presenta la menor turbiedad residual es importante considerar una dosis baja ya que al aumentar la dosis, se torna de color amarillo el agua, debido a las características del cloruro férrico. Éstas pruebas se consideraron como preliminares para obtener las dosis óptimas y establecer las dosis para la planta piloto.

Es importante aclarar que de acuerdo a las hojas técnicas de los coagulantes Nalco® (anexo III. Propuesta de manual de control y operación de la PPP), las máximas dosis recomendadas son de 20 y 40 mg/L respectivamente, en tratamiento de agua para consumo humano.

El tiempo de mezclado es de vital importancia, ya que aun cuando se obtienen gradientes adecuados, si el tiempo es mayor o menor de lo requerido, el proceso no

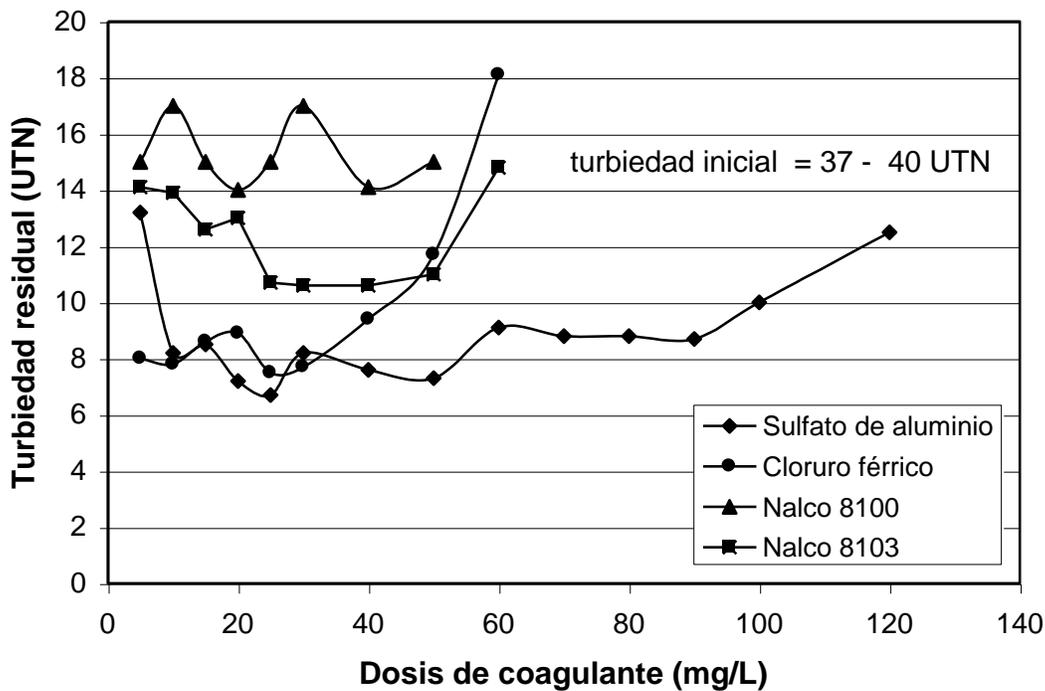
funcionará adecuadamente, debido a que el flóculo no se forma y por ende el proceso de sedimentación por manto de lodo, no se lleva a cabo adecuadamente. Para la planta piloto es una condición particular, debido a su geometría.

**Tabla 4.2. Turbiedad residual para las condiciones de mezclado de la planta considerando agua tipo 2**

Turbiedad residual (UTN)				
Dosis (mg/L)	sulfato de aluminio	cloruro férrico	Nalco 8100	Nalco 8103
5	13.2	-	15	14.1
10	8.2	8.0	17	13.9
15	8.5	<b>7.8</b>	15	12.6
20	7.2	8.6	<b>14</b>	13
25	<b>6.7</b>	8.9	15	10.7
30	8.2	7.5	17	<b>10.6</b>
40	7.6	7.7	14.1	10.6
50	7.3	9.4	15	11
60	9.1	11.7	NR	14.8
70	8.8	18.1	NR	NR
80	8.8	NR	NR	NR
90	8.7	NR	NR	NR
100	10.0	NR	NR	NR
120	12.5	NR	NR	NR

Nota: NR indica no realizado debido a las dosis máximas recomendadas por el proveedor, y al aumento en la turbiedad residual.

En cuanto al povimal® presenta mejor remoción de turbiedad comparado con los coagulantes ya mencionados, obteniendo turbiedad residual menor a 0.5 UTN con dosis de 5 mg/L, Esto se observa en la tabla 4.3. donde se parte de concentraciones mucho más bajas debido a que actúa como polielectrolito, sin embargo es necesario la formación de un flóculo adecuado para la etapa de sedimentación que es por manto de lodo.



**Figura 4.1. Dosis óptima de coagulantes en condiciones de mezclado de la planta para agua tipo 2.**

Se consideran como dosis óptimas aquellas que han formado un tamaño de flóculo al menos de 6 (índice de Willcomb), lo cual solo se cumple para cloruro férrico en 15 mg/L y para povimal® con 5 mg/L. Para sulfato de aluminio fue de 25 mg/L, y para los Nalco® 8100 y 8103 la dosis fue de 20 y 25mg/L respectivamente, aunque solo alcanzan un tamaño de flóculo de 4 (1 mm).

**Tabla 4.3. Turbiedad residual utilizando povimal® para agua tipo 2.**

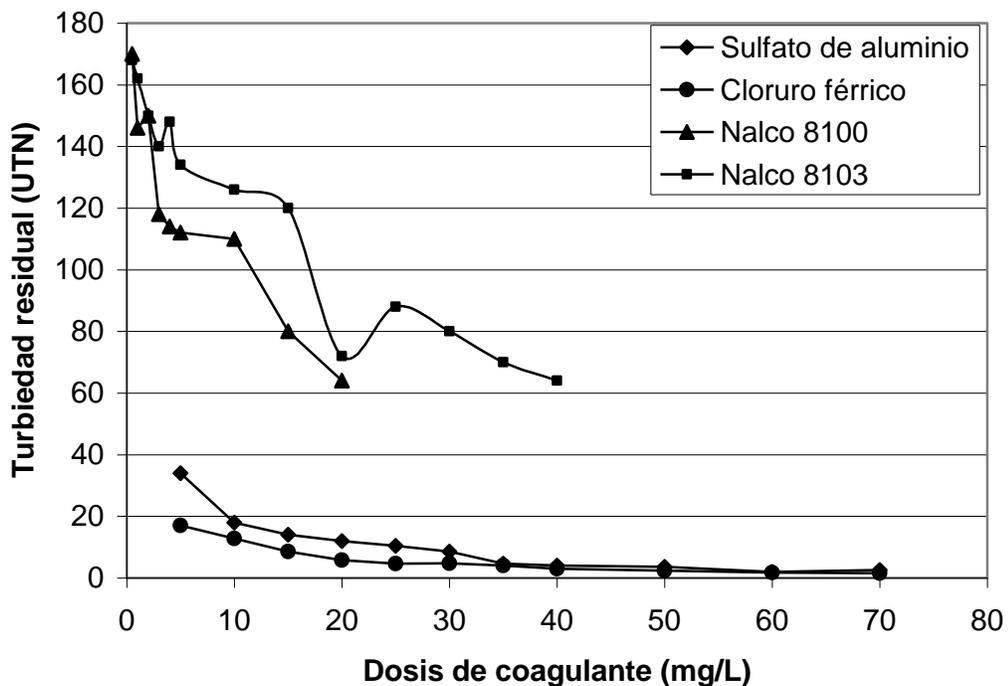
Dosis (mg/L)	Turbiedad residual (UTN)
0.2	18.4
0.4	6.3
0.6	3.9
0.8	1.6
1	1.5
5	0.33
10	0.19
20	0.19

**Para agua tipo 3.**

En la figura 4.2. se observa la dosis óptima de los coagulantes sulfato de aluminio cloruro férrico, Nalco 8100® y Nalco 8103®, siendo la turbiedad residual menor de 64 UTN de acuerdo a los resultados presentados en la figura 4.2. Tabla IV.1 anexo IV.

Para el sulfato de aluminio y cloruro férrico se probaron dosis hasta de 70 mg/L, donde se obtienen turbiedades residuales menores a 5 UTN a partir de dosis de 35 y 25 mg/L respectivamente, aunque es importante considerar que la dosis de coagulante está en función de la calidad del agua a tratar.

Con respecto al tamaño del flóculo (índice de Willcomb), se observó que para los coagulantes de Nalco® se encuentra entre 2 y 4 (<1.0 mm), para sulfato de aluminio y cloruro férrico se encuentra entre 4 y 6 y 6 a 8 respectivamente.



**Figura 4.2. Determinación de la dosis óptima de coagulante para agua tipo 3.**

En la figura 4.3 se compara el sulfato de aluminio y el cloruro férrico con el hidroxiclорuro de aluminio (povimal®). Se observó que cuando se usa povimal® en dosis de 5 mg/L la turbiedad residual es menor de 5 UTN, con un tamaño de flóculo de acuerdo al índice de Willcomb entre 8 y 10 (1.5 a 4 mm), formándose de manera instantánea en la etapa de floculación. En un estudio realizado por Matsui *et al.*, 1998 se reporta que el aumento de la dosis de cloruro de polialuminio reduce el tiempo de desestabilización de partículas coloidales. Los resultados de ambas figuras se presentan en el anexo IV en la tabla IV.1. Varios autores (Camp, 1968, Kawamura, 1991, 2000, Hudson, 1973) reportan dosis menores de cloruro férrico (15 mg/L) y superiores para sulfato de aluminio (20 mg/L).

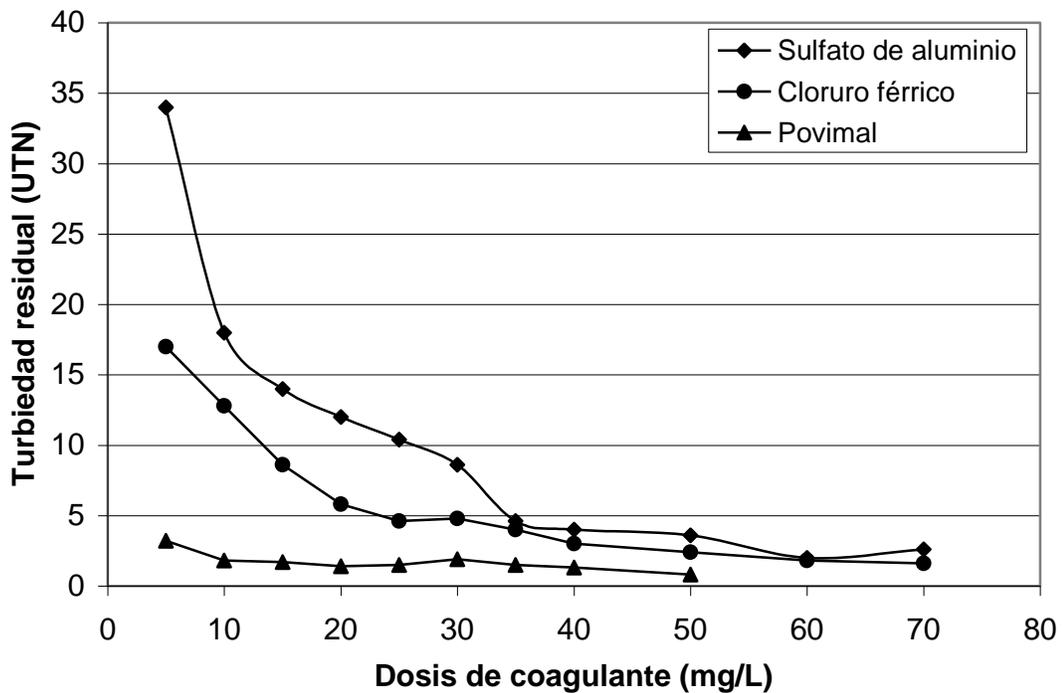


Figura 4.3. Determinación de la dosis óptima de coagulante para agua tipo 3. (cambio de escala).

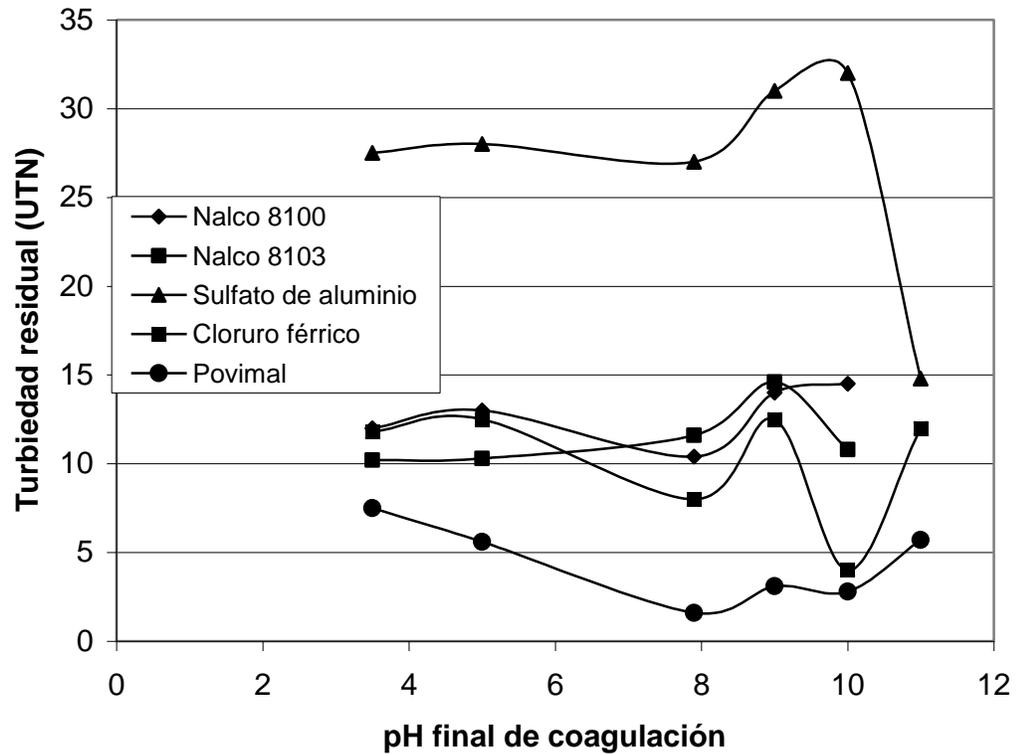
En este estudio las dosis óptimas fueron de 25, 15 y 10 mg/L para sulfato de aluminio, cloruro férrico y povimal® respectivamente, que de acuerdo a los valores de la tabla IV.1 del anexo IV, presentan turbiedades residuales de 10.4, 8.6 y 1.8 UTN respectivamente, sin considerar la aplicación de la filtración donde podrá ser removida ésta turbiedad. Por lo tanto, en la investigación se continuó aplicando éstas dosis.

No se observa una diferencia marcada en cuanto a las dosis óptimas ya que son similares de acuerdo al tipo de agua, aún cuando la turbiedad es diferentes se aplicara prácticamente la misma dosis en una agua de mejor calidad que en una con mayor turbiedad.

#### **4.1.2.2. Determinación de pH óptimo de coagulación-floculación**

##### **Para agua tipo 2**

Aplicando las dosis óptimas obtenidas en el apartado anterior: sulfato de aluminio 25 mg/L, cloruro férrico 15 mg/L, Nalco 8100 20 mg/L, Nalco 8103 30 mg/L (tabla 4.2) y povimal 10 mg/L (tabla 4.3) que corresponden a la turbiedad residual menor, con un índice de Willcomb mayor a 4. Se corrieron pruebas a diferentes pH's (figura 4.4). Que presenta el pH final después de aplicar el coagulante, en la cual se observa que no será necesaria la modificación del pH, ya que la turbiedad residual para los coagulantes empleados no baja más de la obtenida con el pH natural del agua (6.8 – 7.9). En el caso de sulfato de aluminio a pH alcalino (11 unidades de pH), donde se obtiene una turbiedad residual menor a 15 UTN y comparando con la turbiedad obtenida sin modificación del pH, (6.7 UTN en la tabla 4.2.), no se justifica el gasto de reactivo para la modificación de pH ya que no aumenta en gran medida la remoción de turbiedad y el flóculo formado es gelatinoso, que se deberá evaluar para la formación del manto de lodo. Estos resultados se presentan en forma tabular en el anexo IV tabla IV.2.



**Figura 4.4. pH óptimo de coagulación en condiciones de mezclado de la planta para agua tipo 2**

Debido a que esta agua está preparada con caolín el pH no presenta una variación significativa, En los diagramas reportados en literatura se indica para las sales de hierro a un pH mayor a 4 la especie predominante son los hidróxidos de hierro insolubles y a pH menores a 4 se encuentran especies iónicas hidratadas de hierro o poliméricas, en el caso de sales de aluminio, el pH recomendado de coagulación es de 5.5 a 7.5. (Kawamura, 1996a).

### Para agua tipo 3

Para agua tipo 3, como se observa en la figura 4.5. y en el anexo IV tabla IV.3, con los coagulantes sulfato de aluminio, cloruro férrico y povimal® a un pH entre 5 y 9 unidades, se favorece la formación de flóculo estable, teniendo turbiedades residuales entre 1.5 y 5 UTN. El tamaño de flóculo de acuerdo al índice de Willcomb es de entre 8 y 10 (1.5 a 4 mm). Para

el cloruro férrico la turbiedad residual se encuentra entre 3.0 y 4.2 UTN, y para el sulfato de aluminio, la menor turbiedad es de 2.8 UTN se presenta a pH de 6.5. Para el povimal®, a pH de 6.5 se tiene una turbiedad residual de 1.6 UTN. Para el caso del sulfato de aluminio a pH de 9.7, se presenta un aumento en el índice de Willcomb 10 (2.25 a 4 mm), debido a la formación de un gel, procedente de una reacción de acomplejamiento con los iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ), lo que influye en la velocidad de sedimentación, que será necesario evaluar para la formación del manto de lodo, siempre y cuando se considere necesario modificar el pH. Con sulfato de aluminio a un pH ácido, tiene un efecto contrario disminuyendo la velocidad de sedimentación de la partícula floculada y el tamaño de flóculo, esto es debido a que las partículas coloidales se cargan positivamente y por lo tanto se repelen, además a pH aproximado a 4 las sales de aluminio se encuentran en solución como iones hidratados (Kawamura, 1996a).

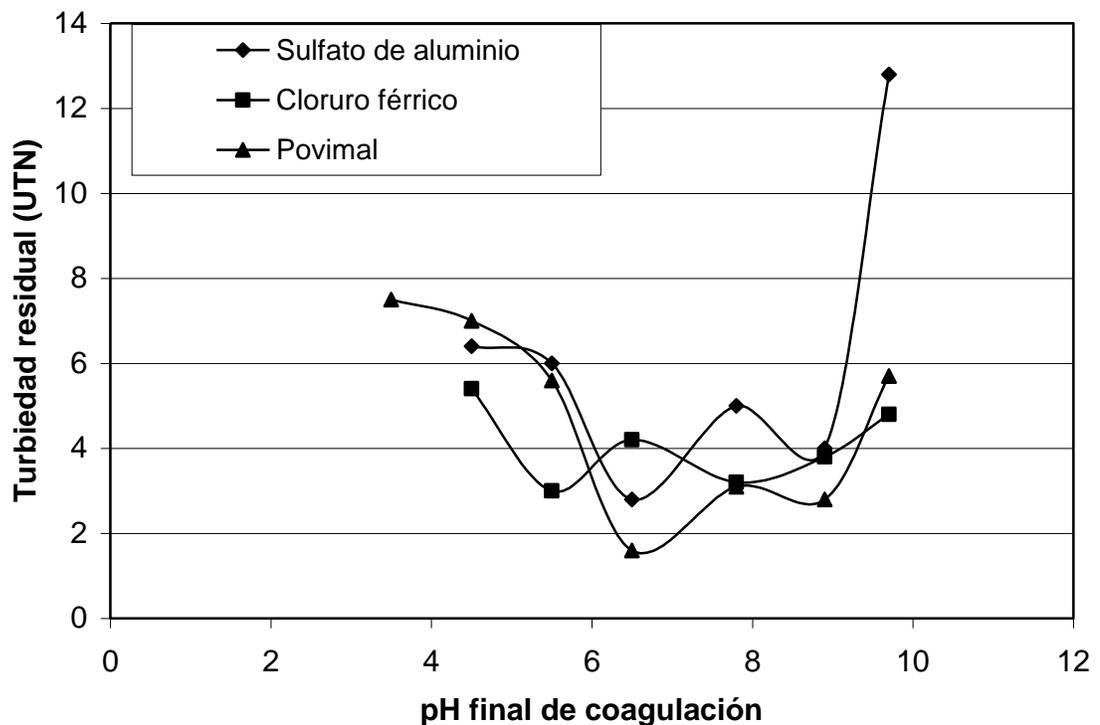


Figura 4.5. pH óptimo en condiciones de mezclado de la planta para agua tipo 3.

#### 4.1.2.3. Determinación del ayudante de coagulación-floculación

Se aplicó ayudante de coagulación, con el fin de obtener un mejor funcionamiento de los coagulantes de menor costo, y abatir los gastos en el uso de éstos mejorando la eficiencia del proceso y la calidad de flóculo para la formación del manto de lodo.

#### Agua tipo 2

Para las pruebas en jarras con ayudante de coagulación, se utilizó una concentración cercana al promedio de 25 mg/L de cloruro férrico como coagulante primario, la cual presentó una turbiedad residual de 8.9 UTN (tabla 4.2) y un tamaño de flóculo de 1.5 a 2.25 mm que corresponde a un índice de Willcomb de 8. Los ayudantes de floculación se aplicaron de acuerdo a lo establecido en la tabla 4.4. En el caso del sulfato de aluminio no se aplicó como coagulante primario debido a que el tamaño de flóculo es muy pequeño (0.5 mm) y de tipo gelatinoso, lo que no es recomendable para la formación del manto de lodo con una turbiedad baja.

En la tabla 4.4. se observa que no existe una eficiencia adecuada al adicionar un polielectrólito, ya que la turbiedad en todos los casos es mayor a la jarra 6 que es la jarra control con la adición del coagulante primario (cloruro férrico). La relación en cuanto a remoción de turbiedad es diferente a la de la tabla 4.2, debido a que el agua preparada aunque de una turbiedad similar (35 – 40 UTN) su composición química fue diferente, ya que se preparó posteriormente y el agua de la cisterna presentaba contaminación visual.

En cuanto al FL18 la menor turbiedad residual es superior comparada cuando se aplica cloruro férrico como control 21 UTN contra 1.4 UTN.

La concentración de polielectrólito que remueve una mayor proporción de turbiedad es JF555 al 26% adicionando 0.5 mL; sin embargo, aún existe una mejor remoción de turbiedad con el cloruro férrico como control de 1.4 UTN en la jarra número 6

(control). No es posible expresar esta concentración en mg/L, debido a que no se cuenta con datos técnicos para realizar la conversión.

**Tabla 4.4. Turbiedad residual en prueba de jarras en condiciones de mezclado de la planta adicionando ayudante de coagulación para agua tipo 2**

Productos químicos (mg/L)					
Jarra	Coagulante primario FeCl <sub>3</sub>	Ayudante de coagulación	Tiempo de floculo incipiente (s)*	Tamaño de floculo**	Turbiedad residual (UTN)
		FL18(10% V) (mL)			
1	25	1	240	0	21
2	25	2	240	0	23
3	25	3	240	0	25
4	25	4	240	0	26
5	25	5	240	0	29
6	25	0	45	8	1.4
		JF555 (26% V) (mL)			
1	25	1	60	8	33
2	25	2	60	8	33
3	25	3	50	8	33
4	25	4	60	6	36
5	25	5	90	4	36
6	25	0	45	8	1.3
		JF555 (26% V) (mL)			
1	25	0.5	60	4	1.63
2	25	0.075	60	6	2.3
3	25	1	60	6	2.9
4	25	1.5	60	6	2.2
5	25	2	55	6	2.4
6	25	0	45	8	1.4
		JF555 (26% V) (mL)			
1	5	0.5	240	2	7.8
2	10	0.5	150	2	5.3
3	15	0.5	150	2	3.9
4	20	0.5	150	2	2.5
5	25	0.5	60	8	2.1
6	25	0	45	8	1.4

Turbiedad inicial 46 – 50 UTN \*\* tamaño de floculo de acuerdo al índice de Willcomb.  
En todos los casos primero se adicionó el coagulante, seguido del polielectrólito.

También se observa en esta tabla la variación de la dosis de cloruro férrico manteniendo constante la dosis de polielectrólito JF555 0.5 %/V, sin embargo, no se alcanza la misma eficiencia de remoción que aplicando el cloruro férrico como control 2.1 y 1.4 UTN respectivamente.

Como conclusión de esta serie de pruebas con el cloruro férrico y como se observa en la tabla 4.4. que aunque se utilice la dosis óptima de mayor remoción, la turbiedad no es menor a 2.1 UTN, aplicando el ayudante de coagulación, por lo tanto no es necesario en el proceso.

### **Agua tipo 3**

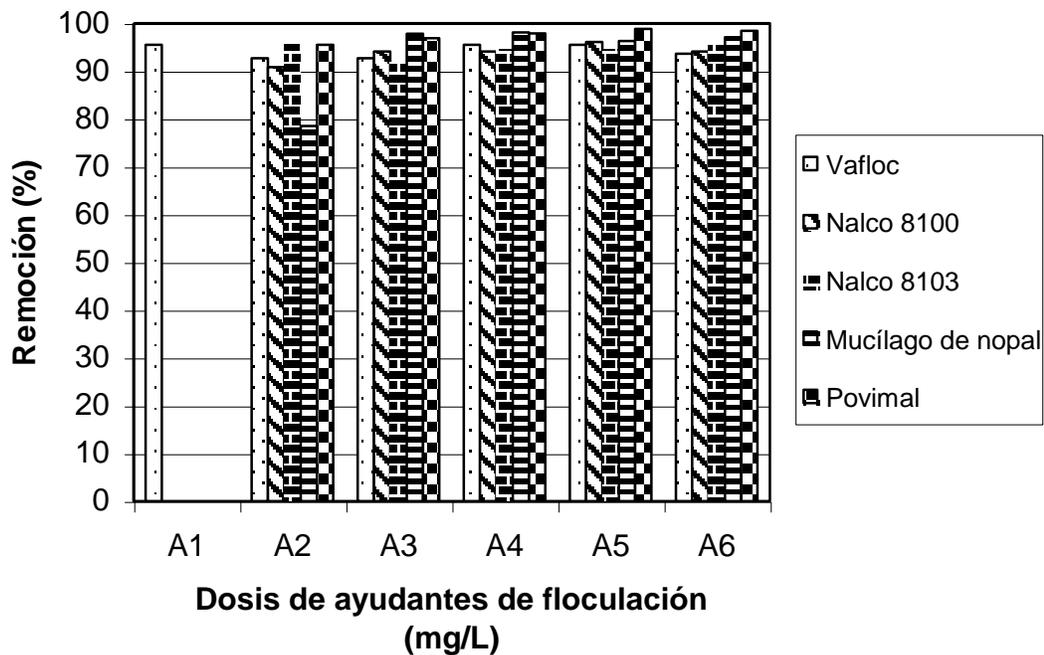
En la figura 4.6. y en el anexo IV tabla IV.4; se observa el porcentaje de remoción con respecto al ayudante de coagulación empleado (vafloc®, Nalco® 8103, Nalco® 8100, mucílago de nopal y povimal®), manteniendo una concentración de 10 mg/L para cloruro férrico. Se consideró importante realizar esta gráfica con respecto al porcentaje de remoción para comparar los polímeros (ayuda coagulantes empleados). La tabla 4.5. corresponde a la figura ya mencionada, tomando como referencia el grupo de la columna A1 corresponde a la dosis de cloruro férrico sin ayuda de coagulante, mientras los grupos de las columnas A2 a la A6 corresponden a los coagulantes mencionados anteriormente en diferentes dosis, realizando en total 30 pruebas.

Se puede apreciar la eficiencia de remoción para cloruro férrico como control entre el 90 y 95%, misma que se mantiene al adicionar cualquiera de los ayudantes de coagulación, o bien se ve disminuida en el caso del Nalco® 8100 y el mucílago de nopal, por lo que no es conveniente la adición de un ayudante de floculación en el caso de mantener como coagulante primario el cloruro férrico, por otra parte en el caso de aplicar el hidroxiclورو de aluminio como ayudante de coagulación las eficiencias de remoción de turbiedad aumentan entre un 2 y 3%, lo que no es significativo si se aplican dos productos químicos.

**Tabla 4.5. Dosis de ayudante de floculación para la figura 4.6.**

Dosis de coagulante por jarra						
Prueba	A1	A2	A3	A4	A5	A6
1. Vafloc® (mg/L)	0	0.5	1	2	3	4
2. Nalco® 8103 (mg/L)	0	0.5	1	2	3	4
3. Nalco® 8100 (mg/L)	0	0.5	1	2	3	4
4. Mucílago de nopal* (%)	0	5	10	15	20	25
5. Povimal® (mg/L)	0	1	2	3	4	5

\*Concentración referida a la cantidad de producto (1 kg) por litro de agua (forma de preparación).



**Figura 4.6. Porcentaje de remoción en la turbiedad comparando ayudantes de floculación con cloruro férrico a 10 mg/L.**

En el caso del sulfato de aluminio como coagulante primario con dosis de 10 mg/L, se aplicaron como ayudantes de coagulación povimal®, mucílago de nopal y cloruro férrico. Se observa en la figura 4.7, y en el anexo IV, tabla IV.5; que para el sulfato de aluminio como control, se tienen eficiencias de 93.9% columna A1, que es similar a la eficiencia que se obtiene para el caso de cloruro férrico como ayuda coagulante (95%). A una concentración de 5 mg/L de ayuda coagulante, se presenta una mayor remoción expresada como turbiedad residual.

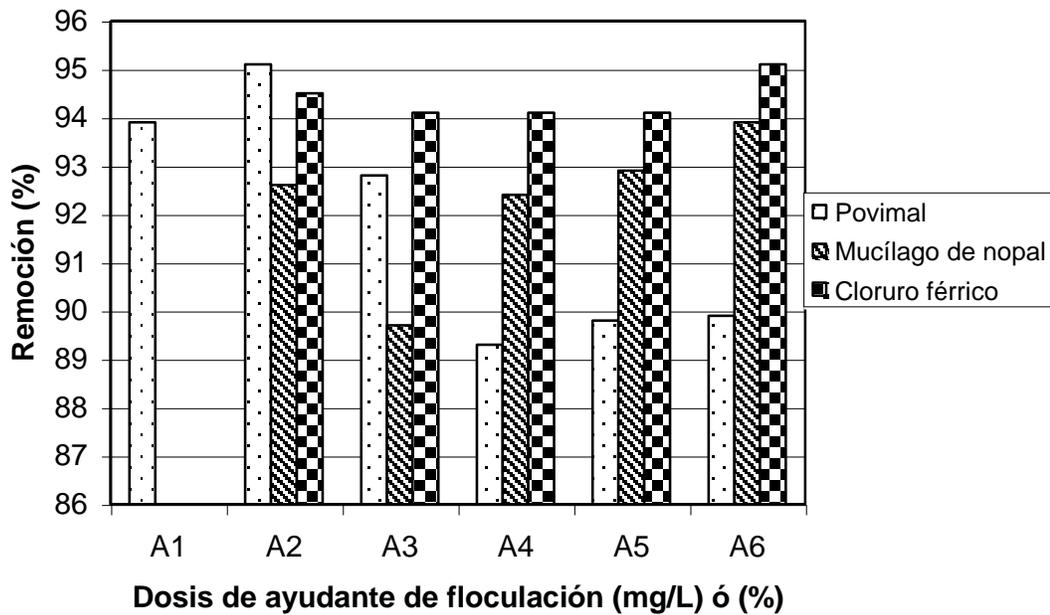
Para el caso de mucílago de nopal se incrementa la eficiencia de remoción en un 5%, sin embargo es posible que al utilizar este producto como coagulante se incremente la materia orgánica en el agua (Fall, 2003), sin embargo no se comprobó este incremento. Con el povimal® como ayudante de coagulación la eficiencia sufre un decremento de un 5%.

Respecto al índice de Willcomb, hay un incremento apreciable en el tamaño del floculo obtenido (< 4 mm) para el caso del mucílago de nopal y povimal® tanto con cloruro férrico, como con sulfato de aluminio usados como coagulantes primarios. La razón por la cual se utilizó el cloruro férrico como ayudante de coagulación fue con el fin de obtener un floculo con un peso mayor al de sulfato de aluminio como control.

**Tabla 4.6. Dosis de ayudante de floculación para la figura 4.7.**

Dosis de coagulante por Jarra						
Prueba	A1	A2	A3	A4	A5	A6
1. Povimal® (mg/L)	0	1	2	3	4	5
2. Mucílago de nopal (%)	0	60	70	80	90	100
3. Cloruro férrico (mg/L)	0	1	2	3	4	5

\*Concentración referida a la cantidad de producto por litro de agua (forma de preparación).



**Figura 4.7. Porcentaje de remoción en la turbiedad comparando ayudantes de floculación para sulfato de aluminio a 10 mg/L.**

Di Bernardo 1998a y b no menciona datos obtenidos sobre resultados con alguno de los ayudantes de floculación y solo se limitan a mencionar reducciones en el consumo de coagulante entre 50-75%, adicionando 0.1 mg/L de polímero sintético ó 1 mg/L de polímero natural.

Considerando que los coagulantes a emplear requieren de indicaciones en cuanto a forma de almacenamiento, esto se reporta en la propuesta de manual de operación y control de la PPP, (Manejo de sustancias químicas) que indica la forma de almacenamiento y seguridad que se debe seguir con los productos químicos a emplear. Anexo III. Propuesta del manual de operación.

#### 4.1.2.4. Caracterización del medio filtrante

##### 4.1.2.4.1. Granulometría de la arena sílica del medio filtrante

El coeficiente de uniformidad se determinó para la arena sílica. En la tabla 4.7. se presenta el análisis granulométrico para una muestra de 200 g. En el caso de la arena de río (descripción y dimensiones de la planta plano A-02) ésta fue previamente tamizada en malla 18 que corresponde a 1.0 mm de tamaño de abertura, por lo que no se realizó el análisis granulométrico.

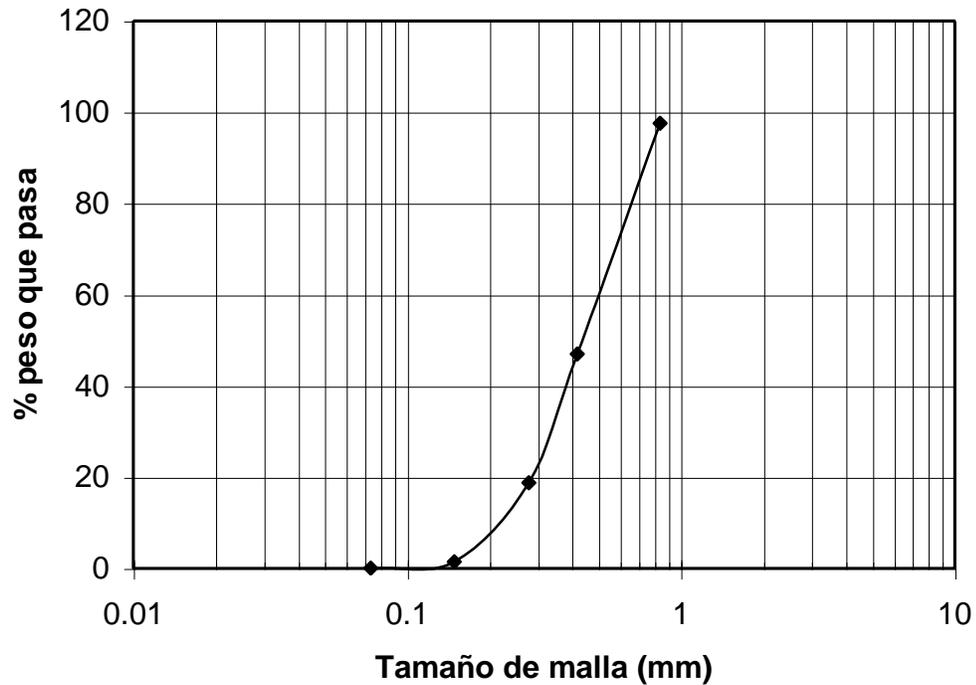
Para la arena sílica tabla 4.7. y figura 4.8., se obtuvo un tamaño efectivo de 0.22 mm, el tamaño del 60% corresponde a 0.5 mm, y un 17.24% es menor a 0.149 mm.

De acuerdo a los resultados anteriores se tiene:

$$\text{Coeficiente de uniformidad} = D_{60}/D_{10} = 2.27$$

**Tabla 4.7. Análisis granulométrico de arena sílica**

Tamiz (serie)	Tamaño de abertura (mm)	Tamaño promedio (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido acumulado (g)	% Retenido parcial	% en peso que pasa
20	0.84	-	5	5	2.53	97.47
40	0.42	0.59	100.0	105.0	20.56	46.92
80	0.279	0.34	55.9	160.9	28.26	18.66
100	0.149	0.20	34.1	195.0	17.24	1.42
200	0.074	0.11	2.8	197.8	1.42	0
Σ			197.8	-	-	-



**Figura 4.8. Análisis granulométrico del medio filtrante (arena sílica).**

Para filtros rápidos, Collins y colaboradores en 1996 reportan un tamaño efectivo de 0.35 mm y un coeficiente de uniformidad de 3.4. Fall (2003) indica que la arena debe de seleccionarse con anterioridad para un filtro rápido, el diámetro efectivo es entre 0.5 a 0.6 mm y el CU < 1.7. Por otra parte Di Bernado (1992) para filtros de doble capa arena antracita recomienda un tamaño efectivo entre 0.45 y 0.6 mm, con un coeficiente de uniformidad menor a 1.5. Por lo que este material no cumple con las especificaciones para filtro rápido.

#### **4.1.2.4.2. Peso específico de la arena sílica del medio filtrante**

El peso específico es de 2.52, comparado con datos de literatura (Arboleda, 1993 y Pérez y Cánepa, 1992) cae dentro de los valores recomendados de entre 1.04 y 4.9 de acuerdo al material y al nivel de homogeneidad.

La porosidad para la arena sílica es de 37.99%.

## 4.2. Cálculo de los parámetros teóricos de diseño y operación

### 4.2.1. Comportamiento de la velocidad de flujo con respecto a la zona de cambio de área del sistema

Fue de particular importancia conocer la variación de velocidad en las zonas de forma cónica con las que cuenta el sistema, con un gasto de  $0.0005 \text{ m}^3/\text{s}$  y tomando como referencia  $xy$  en un eje cartesiano el inicio de la tolva inferior (recirculación de lodo), para obtener en función de la altura ( $y$ ) el área transversal y con esta la velocidad, los cálculos se describen en la memoria de cálculo (anexo II). La figura 4.9. muestra este comportamiento con respecto a la altura, donde se observa una disminución del área que corresponde al punto donde pasa el agua a través de una pequeña reducción para entrar a la zona de formación del manto de lodo.

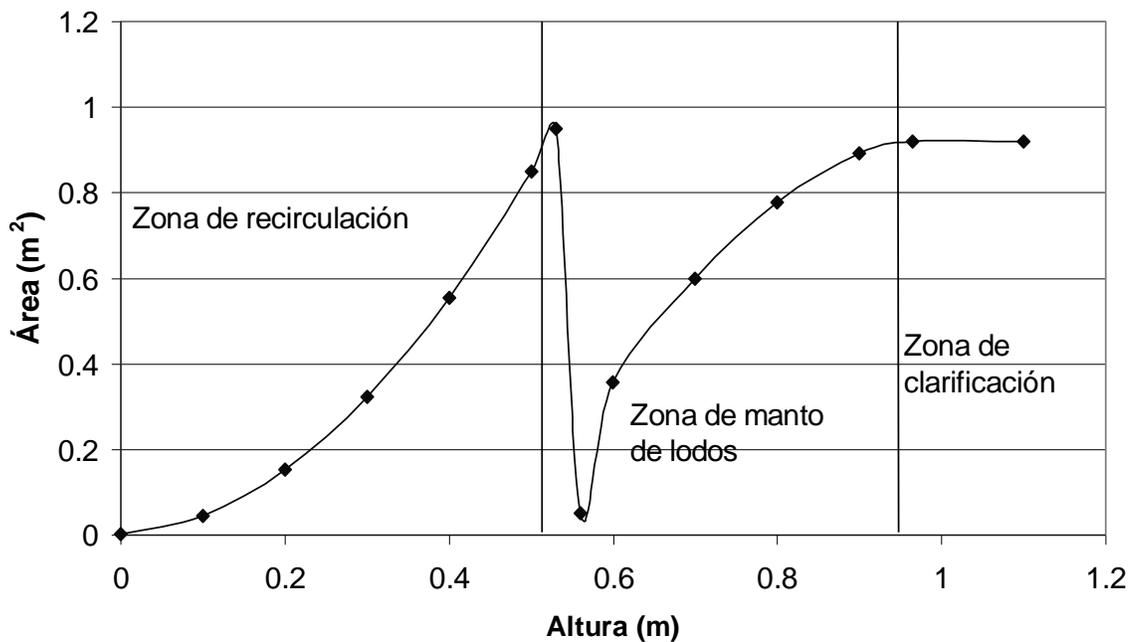
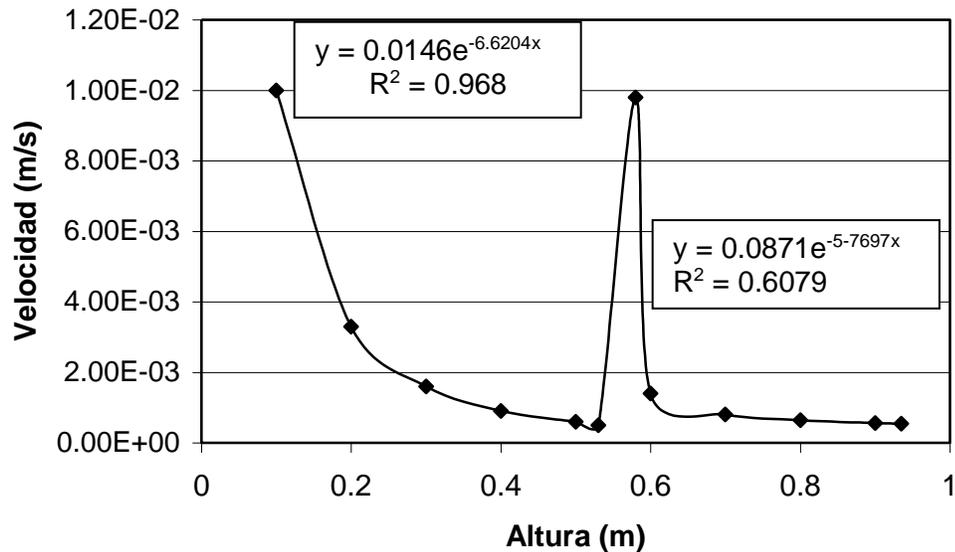


Figura 4.9. Variación de áreas en la zona de sedimentación de la planta piloto

En la figura 4.10 se presentan los cambios de velocidad en los cambios de área mencionados en la figura 4.9 en la cual se observa en la zona de formación el manto de lodo, que el intervalo de velocidad ascensional se encuentra entre 0.00054 m/s (1.94 m/h) y 0.0098 m/s (35.3 m/h) que se contrastará con la velocidad de sedimentación del lodo formado con los diferentes coagulantes con el fin de tener un equilibrio entre velocidades y la formación del manto de lodo.



**Figura 4.10. Variación de la velocidad en la zona de sedimentación de la PPP**

#### 4.2.2. Cálculo de los parámetros de diseño de cada operación unitaria de la planta

De acuerdo a las ecuaciones descritas en la metodología (ecuaciones 3.3 a 3.16) se realizó el cálculo de los parámetros de operación de la planta para un caudal de 0.0005 m<sup>3</sup>/s. Se presentan en las tablas 4.8.y 4.9. Siendo la primera para áreas constantes en las unidades de mezcla rápida, floculación primera sección y clarificación, y la segunda para las secciones de variación de área siendo estas: floculación en su segunda etapa, sección de recirculación de lodo y sección de formación del manto de lodo.

En el caso de los valores en las secciones de área constante, (tabla 4.8.) se tiene que el valor del gradiente de velocidad para la mezcla rápida ( $G = 1500.1 \text{ s}^{-1}$ ) está dentro de lo recomendado en la literatura de acuerdo a Arboleda (2000) y Amirtharajah and Trussler (1986), entre  $1000 - 2000 \text{ s}^{-1}$  y  $1000 - 3000 \text{ s}^{-1}$  respectivamente, el tiempo de retención teórico (nominal) es de 12 s, el cual se encuentra por debajo del valor marcado por Amirtharajah para coagulación por barrido (30-180 s) y por encima del valor marcado por el mismo autor para coagulación por adsorción desestabilización (1–5 s).

En cuanto al número de Camp, es superior a lo recomendado por este mismo autor de entre 12,000 a 14,400 siendo el resultado obtenido experimentalmente de 18001.15

**Tabla 4.8. Parámetros teóricos calculados para secciones sin cambio de área.**

Sección	Diámetro de cada sección (m)	Área de la sección ( $\text{m}^2$ )	Velocidad en cada sección (m/s)	Re	Long. (m)	Pérdida de carga (m)
Mezcla rápida	0.0500	0.002	0.25	1096.49	2.78	0.045
Primera sección	0.2					
floculación		0.029	0.01724	302.48	1.87	0.062
Zona de clarificación	1.1	0.92	0.00054	52.44	1.87	0.203

\* Utilizando el coagulante povimal \*Viscosidad cinemática  $\nu = 1.14 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  a 1

\*Densidad de sólidos =  $2135.5 \text{ kg}/\text{m}^3$  valor obtenido experimentalmente

Sección	Pérdida de carga con lodo (m)	V ( $\text{m}^3$ )	Potencia ( $\text{Nm/s}/\text{m}^3$ )	G ( $\text{s}^{-1}$ )	Tiempo (s)	Número de Camp
Mezcla rápida	3.14	0.006	2565.3	1500.1	12	18001.15
Primera sección						
floculación	2.02	0.055	180.0	397.4	110	43713.01
Zona de sedimentación	2.08	1.72	5.9	72.0	3440	-

~ peso específico de  $9798 \text{ N}/\text{m}^3$  a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$

Para mezcla lenta (floculación) se obtuvo para el gradiente de velocidad un valor de

397.39 s<sup>-1</sup> el cual está por encima del valor reportado por diversos autores con un máximo de 100 s<sup>-1</sup> (Arboleda, 2000; Fair and Geyer, 1987). El tiempo obtenido es de 110 s es superior a lo recomendado en la literatura por los autores ya mencionados de 60 s. Sin embargo, el número de Camp se encuentra en lo recomendado por la AWWA (30,000 – 150,000) con un valor de 43713.01.

En el caso de la etapa de sedimentación se determinó la carga superficial que es de 46.9 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d, el cual se encuentra dentro de lo reportado en literatura (Romero, 1999) de entre 22 a 58 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d para agua fría.

En los casos de las zonas de cambio de área tabla 4.9. se puede observar la variación de la velocidad, en la zona de floculación la velocidad disminuye debido a que el área aumenta, en la zona de recirculación es el efecto contrario, y en la zona de manto de lodo se presenta un decremento de la velocidad de 0.0098 a 0.0005 m/s. como se mostró en la figura 4.10. Para los tres casos se presenta la relación de diámetros menor y mayor y la constante de expansión o reducción según sea el caso, para concluir con la pérdida de carga que para los tres casos es muy pequeña (10<sup>-6</sup>).

Es importante mencionar que los valores recomendados por diversos autores corresponden a sistemas hidráulicos de tratamiento de agua convencionales, por lo que no se espera que se ajusten en su totalidad a un diseño como el estudiado en el presente proyecto.

**Tabla 4.9. Parámetros teóricos calculados para secciones de cambio de área.**

**Zona de floculación, segunda sección**

Altura (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Velocidad (m/s)	Diámetro eq. (m)	Re	V (m <sup>3</sup> )	P (Nm/s)/m <sup>3</sup>	G (s <sup>-1</sup> )	θ (s)	C	D <sub>m</sub> /D <sub>M</sub>	K <sub>ex</sub>	Pérdida de carga (m)
0.001	0.90	0.00055	0.605	299.2	0.0009	2720.46	1544.8	1.808	2.793E+03	0.55	0.49	8.29E-09
0.1	0.60	0.00084	0.492	367.8	0.060	41.13	189.93	119.6	2.272E+04	0.35	0.76	1.94E-08
0.2	0.35	0.00141	0.379	478.1	0.071	34.74	174.56	141.6	2.472E+04	0.28	0.84	3.63E-08
0.3	0.17	0.00287	0.266	681.9	0.052	47.11	203.29	104.4	2.122E+04	0.23	0.91	8.00E-08
0.4	0.06	0.00877	0.152	1191.5	0.023	107.86	307.60	45.6	1.403E+04	0.23	0.94	2.52E-07
0.435	0.04	0.01429	0.119	1520.5	0.015	161.53	376.42	30.45	1.146E+04	0.19	0.94	3.96E-07

**Zona de recirculación de lodo**

Altura (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Velocidad (m/s)	Diámetro eq. (m)	Re	V (m <sup>3</sup> )	P (Nm/s)/m <sup>3</sup>	G (s <sup>-1</sup> )	θ (s)	C	D <sub>m</sub> /D <sub>M</sub>	K <sub>re</sub>	Pérdida de carga (m)
0.001	0.001	0.3968	0.040	16695.9	0.000001	195.182	413.8	0.0025	1.043E+00	0.036	0.51	6.19E-06
0.1	0.05	0.0111	0.239	2793.8	0.005	0.055	6.92	9	6.231E+01	0.044	0.508	1.72E-07
0.2	0.15	0.0033	0.441	1515.1	0.031	0.008	2.66	61.2	1.625E+02	0.057	0.5	5.05E-08
0.3	0.32	0.0016	0.640	1044.4	0.097	0.003	1.49	193.2	2.887E+02	0.08	0.49	2.40E-08
0.4	0.55	0.0009	0.840	796.2	0.222	0.001	0.99	443.2	4.373E+02	0.13	0.47	1.29E-08
0.5	0.85	0.0006	1.040	643.2	0.425	0.001	0.71	849	6.052E+02	0.4	0.38	6.97E-09
0.53	0.95	0.0005	1.100	608.0	0.504	0.000	0.65	1007	6.591E+02			6.46E-06

**Zona de manto de lodo**

Altura (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Velocidad (m/s)	Diámetro eq. (m)	Re	V (m <sup>3</sup> )	P (Nm/s)/m <sup>3</sup>	G (s <sup>-1</sup> )	θ (s)	C	D <sub>m</sub> /D <sub>M</sub>	K <sub>ex</sub>	Pérdida de carga (m)
0.001	0.05	0.0098	0.255	2624.3	0.00005	48221.5	6503.8	0.102	6.634E+02	0.19	0.99	2.97E-07
0.1	0.36	0.0014	0.676	989.1	0.036	68.5	245.1	71.8	1.760E+04	0.36	1	4.28E-08
0.2	0.60	0.0008	0.873	766.4	0.120	20.6	134.3	239.2	3.213E+04	0.53	1	2.45E-08
0.3	0.78	0.0006	0.995	672.3	0.233	10.6	96.2	466.2	4.485E+04	0.70	1	1.83E-08
0.4	0.89	0.0006	1.066	627.1	0.357	6.9	77.7	714.4	5.552E+04	0.87	1	1.83E-08
0.43	0.92	0.0005	1.082	617.9	0.396	6.2	73.8	791.2	5.843E+04			4.01E-07

### 4.3. Procedimiento experimental II. (Pruebas en la planta potabilizadora piloto PPP)

#### 4.3.1. Evaluación del caudal a través de la altura del chorro ascendente (altura de la fuente)

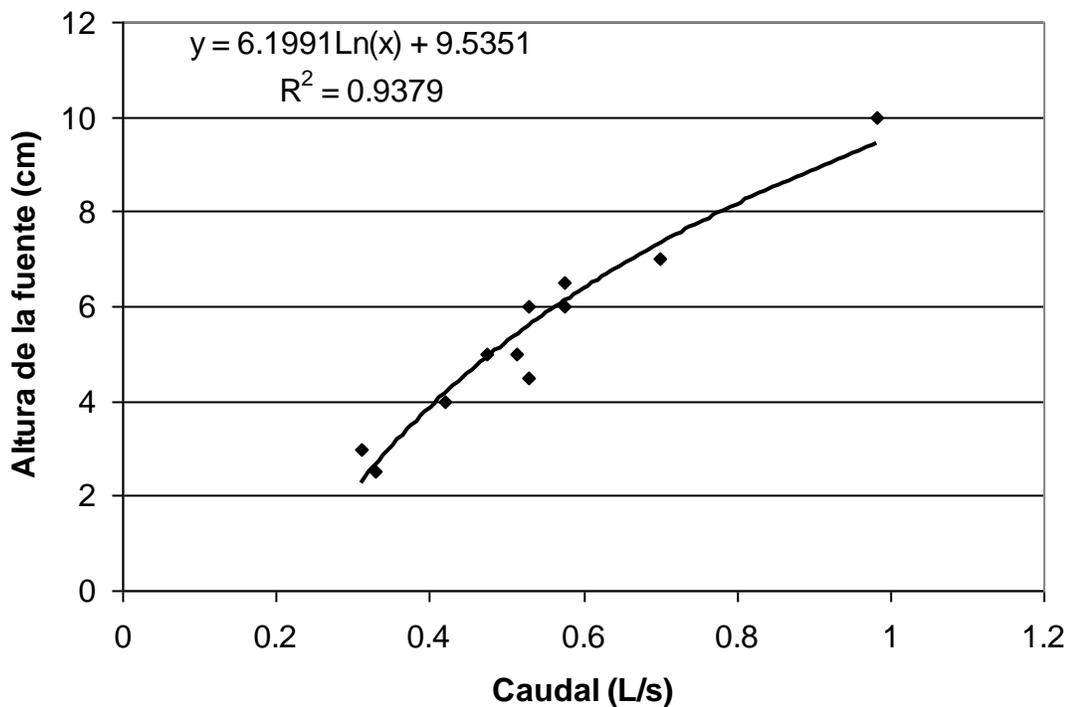
Recordando que en las primeras determinaciones no se contaba con un rotámetro para control del gasto, con el fin de controlar el gasto de entrada al sistema fue necesario:

- 1) medir la altura de la fuente (producida al final de la unidad de mezcla rápida), a diferentes caudales de alimentación como se observa en la figura 4.11. (anexo IV,

tabla IV.6.) donde se puede apreciar que no existe una función lineal entre la altura de la fuente y el caudal de alimentación sino una función logarítmica.

2) calcular el caudal de chorro ascendente por medio de la ecuación 3.17 utilizando la figura 3.3 y la tabla 3.3. Como se observa en la figura 4.12, a un caudal alimentado de 1 L/s corresponde un caudal de chorro ascendente de 2.27 L/s de acuerdo a la tabla IV.7. del anexo IV. Obteniéndose una función logarítmica con un coeficiente de determinación de 0.9915.

Esta determinación se consideró de importancia ya que al correr las pruebas en planta había una variación de las condiciones hidráulicas, debido a la variabilidad del gasto de alimentación.



**Figura 4.11. Relación del gasto de alimentación con la altura de la fuente (chorro ascendente).**

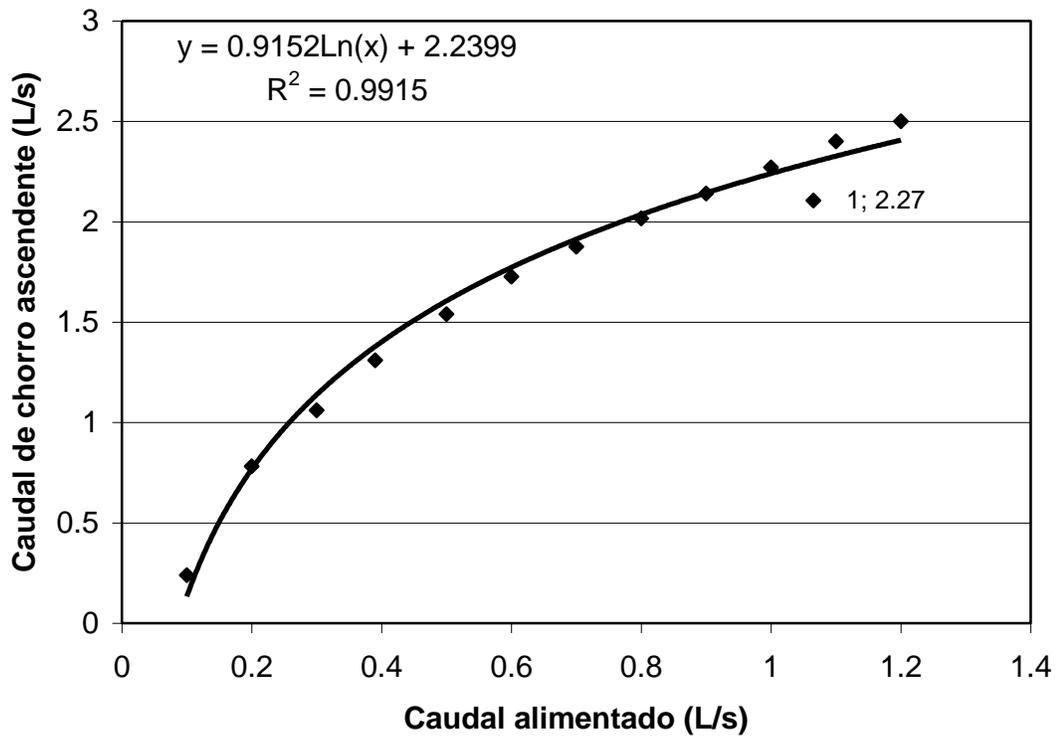


Figura 4.12. Caudal de la fuente con respecto al caudal alimentado.

### 4.3.2. Comportamiento hidráulico de la PPP

#### 4.3.2.1. Análisis de flujos y factores que determinan el tiempo de retención en la PPP

Según la metodología descrita en el apartado 3.3.2.1. se obtienen los resultados de los análisis del tiempo de retención realizados de forma instantánea los cuales se presentan en la tabla 4.10, donde se observa el tiempo de retención nominal calculado por operación unitaria y el tiempo promedio de retención encontrado experimentalmente. Así mismo, se determinó el coeficiente  $D/uL$  que corresponde a la dispersión que se presenta en el reactor.

Los tiempos teóricos en las primeras etapas del reactor (mezcla rápida y mezcla lenta) son similares a los determinados experimentalmente, sin embargo, en las etapas de formación del manto de lodo y clarificación son diferentes a los resultados teóricos.

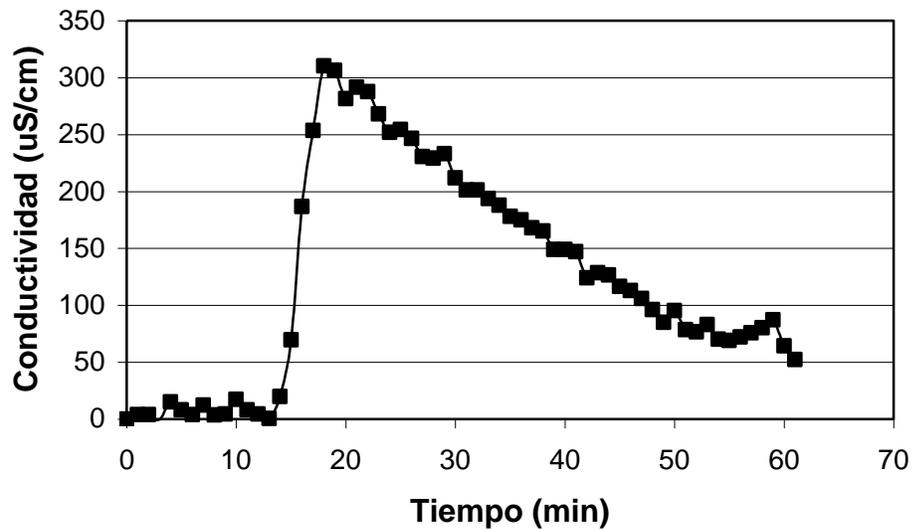
**Tabla 4.10. Tiempo de retención obtenido en prueba instantánea con trazador**

Unidad de estudio	Tiempo teórico (s)	Tiempo experimental (s)	D/uL
Mezcla rápida	12	9.62	0.138
Mezcla lenta	110	139	0.0218
Inicio del manto de lodo	900	75.6	0.0204
Fin del manto de lodo	791	83.3	0.06
Clarificación	3440	2851	0.078

Esto es debido a que el reactor tiene puntos muertos o cortos circuitos, donde no existe una distribución de la sal de forma homogénea en toda el área del reactor, pasando ésta a la etapa de formación del manto de lodo sin pasar por la tolva inferior (etapa de recirculación de lodo), generando una dispersión del trazador que presenta un pico al inicio de la determinación de conductividad seguido de una cola muy larga hacia el final de la prueba.

Esto se aprecia en la figura 4.13, que es una prueba para la sección del manto de lodo, en la cual se tiene un incremento de la conductividad aproximadamente al minuto 16 de iniciada la prueba, pero que se extiende en una distribución robusta hasta aproximadamente 60 minutos, tiempo en el cual se da por terminada la prueba.

En el anexo V se presentan ejemplos de los cálculos realizados para la obtención de los tiempos de retención reales.



**Figura 4.13. Concentración del trazador en función del tiempo para la sección del manto de lodo, con inyección de trazador de forma instantánea.**

La relación  $D/uL$ , indica la dispersión del trazador al realizar la prueba por lo que si éste valor es pequeño (tiende a cero), la dispersión es despreciable encontrándose en un régimen de flujo pistón, mientras que si el valor es grande (tiende a infinito) el sistema se comporta como un reactor de mezcla completa.

En el caso de las secciones de mezcla lenta y el inicio del manto de lodo, se presenta una dispersión intermedia (0.02) (Levenspiel, 1972), indicando un acercamiento a un reactor de tipo flujo pistón, lo cual tiene cierta lógica, ya que en esta sección, el flujo es ascendente dentro de una tubería.

Así mismo, en la etapa final del manto de lodo (fin de la tolva superior), se presenta una dispersión intermedia, así como en la etapa de clarificación, en la cual el régimen de flujo debe ser cercano al pistón, que es lo que se espera para la etapa de clarificación.

En el anexo V. se presenta la forma en que se trabajaron los resultados experimentales arrojados por el software adquadata-UAEM (Ilagorre y Rivas, 2002), donde después de hacer algunos ajustes a los datos de las curvas y obtener una

función polinomial, se calcula el área bajo la curva por medio de integración auxiliándose en el software Matlab edición estudiantil (Matlab, 1996, Levenspiel, 1987., Fogler, 2001).

En el caso de la determinación con inyección en escalón, se presenta solamente para la última etapa del reactor (zona de clarificación), obteniendo un tiempo de retención de 2850 s, que comparado con el teórico se observa un comportamiento similar al calculado por el método de inyección instantánea (2238 s), que está por debajo del teórico 3440 s.

#### **4.3.2.2. Determinación de las pérdidas de carga en la PPP**

Como se mencionó anteriormente la pérdida de carga se determinó teóricamente por la sumatoria de las ecuaciones (3.6 y 3.7) para cada una de las operaciones unitarias, para agua pura como con la ecuación 3.12 para agua con lodo generado utilizando povimal® como coagulante, siendo estas de 0.31 m y 7.24 m respectivamente, hasta antes de la filtración y de 0.02 m para la etapa de filtración.

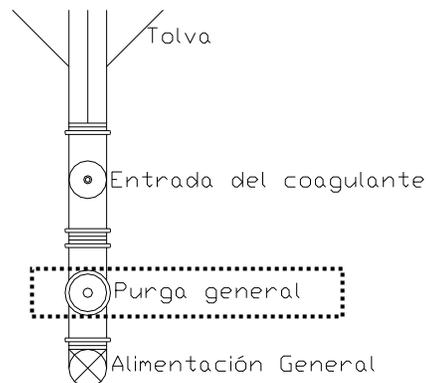
En los resultados experimentales, la diferencia de alturas de líquido en los distintos piezómetros no varía, o varía entre 1 mm y 2 mm por lo que se considera despreciable, esto es debido a que el agua no encuentra oposición durante su carrera, al ser un sistema que trabaja por gravedad, las pérdidas de carga será debida a cambios de sentido, en cambio cuando hay flóculos presentes el comportamiento es diferente ya que el manto de lodo funciona como un filtro por lo que la pérdida de carga aumenta además de la geometría del sistema.

En el caso del filtro se considera que este no se colmato por lo que al realizar la medición experimental no hay la variación que se esperaba y aparentemente la pérdida de carga es despreciable. Se debe realizar la prueba cuando el filtro tenga más tiempo de uso.

### 4.3.3. Operación de la PPP

De acuerdo con la metodología que se detalló, en el capítulo 3. y con algunas modificaciones de acuerdo a las circunstancias de cada prueba, se analizó la evolución de éstas y los resultados arrojados durante su desarrollo.

Al momento de realizar las primeras pruebas en planta se observó necesario colocar una purga general en la zona de alimentación de la planta con el fin de eliminar el lodo acumulado en la tolva inferior, ya que al terminar cada prueba quedaban residuos de lodo que no se podían eliminar del sistema. En la figura 4.14, se observa una "T" de 1 pulgada de diámetro, y la purga general instalada (recuadro con línea punteada).



**Figura 4.14. Localización de la purga general**

#### 4.3.3.1. Resultados de las pruebas en planta para el agua tipo 1

De acuerdo a la caracterización del agua (tabla 4.1) y los resultados obtenidos en la prueba de jarras para agua tipo 1 sólo se realizaron las operaciones unitarias de filtración y desinfección.

En las tablas 4.11a. y 4.11b., cada una de un día (aproximadamente 6h/día) se muestran los resultados de la evaluación de las etapas de filtración y desinfección observando la producción de cloro medida en el agua de salida como cloro residual y cloro total, así mismo se muestran los parámetros de control durante el proceso de evaluación.. El gasto de alimentación fue de 0.48 L/s y el volumen del agua tratada correspondió a 21.8 m<sup>3</sup>. Para dos días de pruebas se utilizaron 150 g de hidróxido de sodio y 600 g de cloruro de sodio metodología del apartado 3.3.5.

Estudios realizados por Brust-Carmona y colaboradores (1996), en una celda solar y aplicando 300 g de hidróxido de sodio y 1500 g de sal de cocina, reportan la generación de gas cloro suficiente por 10 horas para desinfectar 200 m<sup>3</sup> de agua con un costo aproximado de \$8.00 pesos.

En la tabla 4.11a., se observa que la producción de cloro gas y la temperatura de la celda aumentan simultáneamente, ya que a un tiempo de 35 minutos, la temperatura fue de 20°C con una concentración de cloro residual de 0.11 mg/L y cloro total de 0.22 mg/L. Para 120 minutos de prueba a una temperatura de la celda de 25°C la concentración de cloro residual aumentó a 1.1 mg/L y una hora después (180 minutos de prueba) con una temperatura de 29 °C la concentración de cloro residual aumentó a >3.5 mg/L. La metodología utilizada para cuantificar el cloro residual fue por medio de un kit, por lo que es una aproximación debido a que es un método comparativo de color y dependerá del sujeto que realiza la determinación.

**Tabla 4.11a. Evaluación de las pruebas en planta para el agua tipo 1**

Tiempo (min)	Temperatura celda (°C)	Cloro residual (mg/L)	Cloro total (mg/L)	Conduc. (μS/cm)	Turbiedad (UTN)	Color (Pt/Co)	Voltaje (V)
20	14	0.11	0.22	3.74	3	34	N.D.
35	20	0.11	0.22	4.05	2.5	34	N.D.
120	25	1.1	1.7	4.41	1.28	9	N.D.
180	29	>3.5	>3.5	4.31	0.92	6.6	N.D.
300	N.D.	>3.5	>3.5	4.13	0.7	3	10.7
360	N.D.	>3.5	>3.5	4.49	0.6	5	10.6
400	N.D.	>3.5	>3.5	3.97	0.7	8	10.5

T<sub>i</sub> = 12° C 9:05 h llenado del sistema. Se midió cloro residual a los 30 min. de realizarse la inyección del cloro gas. Q = 0.48 L/s. N.D. no determinado. Tiempo total 6.6 horas.

Vosseler y colaboradores (2000) mencionan que las reacciones que se llevan a cabo en una celda electrolítica son dependientes de la temperatura de la solución. Ya que a mayor temperatura la velocidad de disociación aumenta.

Para el segundo día en el cual no se adicionó más producto químico (NaOH ó NaCl) Tabla 4.11b, se observa que a los 80 minutos de iniciada la prueba la temperatura alcanzada es de 23°C, y la producción de cloro libre en el agua es de 1.7 mg/L. A los 150 minutos con 25°C alcanza la producción de cloro superior a los 3.5 mg/L hasta finalizar la prueba.

**Tabla 4.11b. Evaluación de las pruebas en planta para el agua tipo 1.**

Tiempo (min)	Temperatura celda (°C)	Cloro residual (mg/L)	Cloro total (mg/L)	Conduc. (µS/cm)	Turbiedad (UTN)	Color (Pt/Co)	Voltaje (V)
30	14	N.D.	N.D.	15.46	1.4	11	N.D.
60	N.D.	0.1	0.4	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
80	23	1.7	3.0	5.43	1.44	15	14.4
130	N.D.	1.8	3.5	5.59	1.64	19	14.1
150	26	3.25	>3.5	5.26	1.66	25	13.8
210	31	>3.5	>3.5	5.23	1.24	14	14.6
270	N.D.	>3.5	>3.5	5.72	0.9	6	11.9
330	N.D.	>3.5	>3.5	5.27	0.79	6	13.9
360	N.D.	>3.5	>3.5	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

Continuidad de la prueba sin adición de reactivos  $T_{NaOH} = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$  .  $T_{NaCl} = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$  .  $Q = 0.48\text{ L/s}$ .  
N.D. no determinado. Tiempo total 6 horas.

Para determinar la eficacia de la desinfección con gas cloro se realizaron análisis microbiológicos de coliformes totales y fecales cuyos resultados se encuentran en la tabla 4.12.

**Tabla 4.12. Análisis de microorganismos patógenos en prueba en planta con agua tipo 1.**

	Coliformes totales NMP/mL	Coliformes fecales NMP/mL
Límites permisibles de acuerdo con NOM127-SSA1-1994	No detectable NMP/100 mL	No detectable NMP/100 mL
Muestra sin cloro	46000	300
Muestra con cloro	9	30

Donde se observó aún con la adición de gas cloro, un valor que sigue siendo alto de bacterias coliformes totales y fecales, que se atribuye su presencia a una posible contaminación en la recolección de la muestra de agua, o bien a una baja eficiencia en el método de desinfección, por lo que será necesario realizar más determinaciones.

Con respecto al pH de la celda, se mantuvo entre 7.0 y 7.1 durante la prueba para ambos días, en cuanto a color, se presenta variabilidad de 3 a 25 unidades de color Pt/Co. Sin embargo al analizar los valores de turbiedad residual del agua al salir del medio filtrante la turbiedad residual se encuentra entre 1.7 a 0.79 UTN.

Se evaluó el gasto de salida del agua durante los dos días de prueba teniendo un promedio por día de 0.21 L/s y 0.17 L/s lo que indica que la velocidad del medio filtrante disminuyó en 0.04 L/s. Considerando el área del medio filtrante (1.32 m<sup>2</sup>). La velocidad obtenida en la carrera del filtro es de 13.7 m/d que corresponde a un filtro lento.

#### **4.3.3.2. Resultados de las pruebas en planta para el agua tipo 2**

Las primeras pruebas para el agua tipo 2, sirvieron para evaluar la operación y el manejo adecuado de la planta, por lo que se corrieron sin la presencia del medio filtrante, hasta obtener la optimización principalmente del proceso de coagulación floculación. Con respecto a la formación del manto de lodo estas pruebas sirvieron para verificar la formación de éste y caracterizar los flóculos que forman el manto de lodo.

Las primeras pruebas en planta se corrieron durante tiempos cortos, ya que se evaluó el gasto de entrada, la dosis del coagulante (hidroxi cloruro de aluminio, cloruro férrico y sulfato de aluminio) y la formación del flóculo de acuerdo al coagulante aplicado sirviendo éstas para conocer el funcionamiento del sistema.

En la tabla 4.13. se presentan los resultados de una prueba de 30 minutos de duración, utilizando el coagulante povimal®, es importante mencionar que para este tipo de agua sólo se utilizó el povimal® en pruebas en planta debido a que el color se incrementa en el agua de salida cuando se aplica cloruro férrico.

**Tabla 4.13. Prueba 1 con povimal®.**

<b>Concentración: 10 mg/L. <math>Q_{\text{Dosisificadora de coagulante}} = 0.5 \text{ mL/s}</math> inicio de la prueba con equipo lleno arranque 9:10 horas duración: 20 y 30 minutos</b>				
<b>Turbiedad residual (UTN)</b>				
<b>Tiempo minutos</b>	<b>Punto de muestreo No. 2 (salida de mezcla rápida)</b>	<b>Punto de muestreo No. 4 (primera toma de zona del manto de lodo)</b>	<b>Punto de muestreo No. 5 (segunda toma de la zona del manto de lodo)</b>	<b>Punto de muestreo No. 14 (salida de la clarificación)</b>
0	ND	94	77	50
10	ND	85	65	46
20	ND	64	64	47
<b>Paro automático de la bomba reinicio 11:10 <math>T_i=91</math> UTN</b>				
0*	ND	75	74	53
10	ND	66	64	55
20	113	82	71	73
30	134	69	77	74

ND = no determinado

Esta prueba se inició con un caudal de 0.5 L/s, con lo que se observó una formación de un flóculo de buen tamaño (6-8 de acuerdo al índice de Willcomb, 1- 2.25 mm); sin embargo la fluidización aun era alta (turbiedad residual alta en el punto de muestreo No. 14, mayor a 46 UTN). Otro problema detectado, la acumulación de líquido en la unidad de filtrado, la cual se inundó, con el consecuente paro automático, ya que en la parte superior de esta unidad se tiene un flotador para el paro automático de la bomba de alimentación y evitar con esto inundaciones.

En el reinicio, se aumentó el gasto de alimentación ( $Q = 0.7 \text{ L/s}$ ) con el consecuente movimiento del lodo, fluidización del manto de lodo. A pesar del aumento, en la turbiedad residual, existe un notorio aumento en la concentración de lodo en la mezcla rápida, punto de muestreo No. 2 (113 – 134 UTN), lo que indica la formación de partículas floculadas.

De esta prueba se concluyó, que se requiere de un periodo de tiempo más largo, para que el equipo logre el equilibrio, ya que esta prueba sólo duró 50 minutos considerando el paro de la planta.

**Tabla 4.14. Prueba 2 con povimal®.**

Q = 0.4 L/s; Turbiedad inicial: 74 UTN. Color 840 Coagulante: povima®; concentración: 10 mg/L. arranque 9:25 horas Duración: 198 minutos				
Turbiedad residual (UTN)				
Tiempo minutos	Punto de muestreo No. 2 (salida de mezcla rápida)	Punto de muestreo No. 4 (primera toma de zona del manto de lodo)	Punto de muestreo No. 9 (novena toma de la zona de clarificación)	Punto de muestreo No. 14 (salida de la clarificación)
0	58	16	ND	26
22	98	56	52	7.4
40	102	96	86	11.2
60	140	76	68	24
80	294	56	40	22
95	286	62	68	18
130	280	22	36	14
155	240	32	30	14
189	248	58	34	12

ND = no determinado

De la tabla 4.14. se desprende que, al aumentar el tiempo del desarrollo de la prueba, (>3 horas) se observa un aumento continuo en la cantidad de sólidos de la mezcla rápida, punto de muestreo No. 2, que inicia con 58 UTN y después de 189 minutos llega a 248 UTN lo que indica la formación de flóculos con el coagulante empleado; además la turbiedad residual a la salida del sedimentador disminuye a medida que avanza en tiempo la prueba, (punto de muestreo No. 14), estableciéndose un equilibrio después de un inicio de lecturas extremas, bajando la turbiedad de 26 al tiempo cero a 12 UTN a los 189 minutos de prueba.

Por otra parte la turbiedad aumenta en los puntos de muestreo No. 4 y 9, en la primera donde tiende a aumentar de 56 UTN a 22 minutos, 62 UTN a 95 minutos y al

final de la prueba 189 minutos disminuye a 58 UTN, lo que indica que el manto de lodo está en proceso de formación, un comportamiento similar se presenta en la turbiedad, en la última toma del manto de lodos (punto de muestreo No. 9), ya que la turbiedad tiende a disminuir de manera mas constante de 86 UTN a los 40 minutos de prueba hasta 34 UTN al finalizar la prueba, por lo que es necesario aumentar el tiempo de trabajo del sistema.

Se detectó mal funcionamiento de la bomba, esto se atribuye a la acumulación de lodo en la tolva inferior de la planta, lo que trae como resultado la disminución del gasto de alimentación, otro problema detectado fue la acumulación de sólidos en el fondo de la cisterna, con el consecuente mal funcionamiento de la pichancha, se continuó con el estudio con un par de pruebas de una duración mayor (2.5 a 5 horas) y cuyos resultados, se muestran en forma tabular en las tablas 4.15. y 4.16. para las pruebas 3 y 4 respectivamente.

En la tabla 4.15. se observa la turbiedad residual a la salida del clarificador, (punto de muestreo No. 14) la cual tiene un valor de 3.6 UTN durante los primeros 30 minutos, después de 40 min. se presenta un aumento de la turbiedad residual a 7.4 UTN y 8.2 UTN a los 60 min. para un posterior aumento 16 UTN a los 90 minutos, lo que indica que se presentó una fluidización del manto de lodo, mismo que se comprueba en el análisis del comportamiento del manto de lodo, ya que la turbiedad en el punto de muestreo No. 5, tiende a aumentar alcanzando 60 UTN al minuto 155. Sin embargo, a los 100 minutos hay un cambio en el gasto de alimentación, que se refleja en una baja turbiedad en el punto de muestreo No. 4, de 95 UTN, pero que no se refleja en el área de sedimentación, ya que la turbiedad sigue en descenso, sin embargo se considera que en esta prueba aún no se ha alcanzado la estabilidad en la formación del manto de lodo aunque se observa su aparente formación.

**Tabla 4.15. Prueba 3 con povimal®.**

<b>Modificación de la segunda etapa concéntrica. Turbiedad inicial: 86 UTN. Coagulante: povima®; concentración de llenado 10 mg/L Duración: 155 minutos.</b>			
<b>Turbiedad residual (UTN)</b>			
<b>Tiempo minutos</b>	<b>Punto de muestreo No. 4 (primera toma de zona del manto de lodo)</b>	<b>Punto de muestreo No. 5 (quinta toma de la zona del manto de lodo)</b>	<b>Punto de muestreo No. 14 (salida de la clarificación)</b>
0	134	ND	3.7
20	28	ND	3.6
30	10.7	ND	3.6
40	11.4	ND	7.4
50	>200	ND	7.8
60	>200	42	8.2
90	>200	31	16
100*	95	31	14
110	>200	35	5
155	>200	60	4.1

ND = no determinado

\* Se realizó aumento de caudal de 0.3 a 0.5 L/s.

Con respecto a la tabla 4.16. que corresponde a una prueba en planta con duración de 5 horas, se observa que el comportamiento de la turbiedad residual en el punto de muestreo No. 14, en los primeros 20 minutos, disminuye (3.5 UTN) y a los 60 minutos se incrementa (8.2 UTN) por lo que se concluye que el lecho se fluidizó ligeramente, sin embargo, se alcanza la estabilidad del mismo después de los 100 minutos, obteniendo una turbiedad residual menor a 9 UTN y disminuye en función del tiempo.

En el punto de muestreo número 4 el cual corresponde al inicio del manto de lodo, se observa una turbiedad mayor a 200 UTN (límite de detección del equipo) misma que se observa en los puntos de muestreo 5 y 6 a los 60 y 170 minutos respectivamente, esto induce la formación del manto de lodo, ya que después de 50 minutos de prueba, la altura del manto es de 9 cm, posteriormente a los 160 minutos alcanza una altura de 18 cm, a los 270 minutos de prueba la altura del manto es de 27 cm.

La altura del manto de lodo es determinada de acuerdo a la turbiedad residual medida, ya que la separación entre los puntos de muestreo es de 9 cm, por lo tanto si la turbiedad residual es mayor de 200 UTN se considera que el manto de lodo está a la altura de este punto de muestreo. Por lo tanto si se presenta en los puntos de muestreo No. 4 y 5 una turbiedad residual > 200 UTN, esto implica que el manto de lodo tiene una altura de 9 cm. Al obtener en el punto de muestreo No. 6, una turbiedad residual > 200 UTN se considera que el manto de lodo cuenta con una altura de 18 cm.

A un tiempo de 240 minutos, se suspendió la adición de coagulante, esto es debido a que el coagulante crudo que se acumula en la parte inferior de la tolva, se recircula para el tratamiento del agua obteniendo el beneficio de ahorro del producto químico, observando un funcionamiento adecuado de la planta, sin alimentación de coagulante de 1 h.

Las pruebas efectuadas hasta este momento fueron realizadas sin tener el dispositivo de recirculación de lodo (plano A-03) sin embargo, se consideró necesario evaluar la PPP con este dispositivo que tiene como objeto aumentar la turbulencia y succión de lodo hacia la mezcla rápida rompiendo el flóculo de mayor tamaño que se acumula en la tolva inferior y ayudar a la formación del manto de lodo.

**Tabla 4.16. Prueba 4 con povimal®.**

Llenado con 0.5-0.7 L/s. inicio 8:00 arranque 8:30. Turbiedad inicial: 98 UTN. Coagulante: povimal®; concentración: 10mg/L duración: 300 minutos						
Turbiedad residual (UTN)						
Tiempo (min.)	Punto de muestreo No. 4 (primera toma de zona del manto de lodo)	Punto de muestreo No. 5 (segunda toma de la zona del manto de lodo)	Punto de muestreo No. 6 (tercera toma de la zona del manto de lodo)	Punto de muestreo No. 7 (cuarta toma de la zona del manto de lodo)	Punto de muestreo No. 14 (salida de la clarificación)	Caudal (L/s)
0	> 200	ND	ND	ND	3.1	0.3
20	> 200	139	ND	ND	3.5	0.2
40	> 200	147	ND	ND	18	0.2
60	> 200	> 200	ND	ND	15.8	0.4-0.5
80	> 200	> 200	59	ND	12.9	0.4-0.5
100	> 200	> 200	61	ND	9	0.4-0.5
130	> 200	> 200	75	ND	5.2	0.6-0.7
150	> 200	> 200	179	ND	5	0.6-0.7
170	> 200	> 200	> 200	ND	3.2	0.6-0.7
190	> 200	> 200	> 200	ND	2.4	0.6-0.7
210	> 200	> 200	> 200	44	2.1	0.6-0.7
230	> 200	> 200	> 200	41	1.6	0.6-0.7
270	> 200	> 200	> 200	> 200	3	0.6-0.7
300	> 200	> 200	> 200	> 200	5.4	0.6-0.7

ND = No determinado

Una vez colocado el dispositivo, se llevaron a cabo, una serie de pruebas, de las cuales su finalidad principal, fue observar, si mediante el uso del mismo, se evita la excesiva acumulación de lodo en la zona cónica inferior y si se contribuye a la formación del manto de lodo.

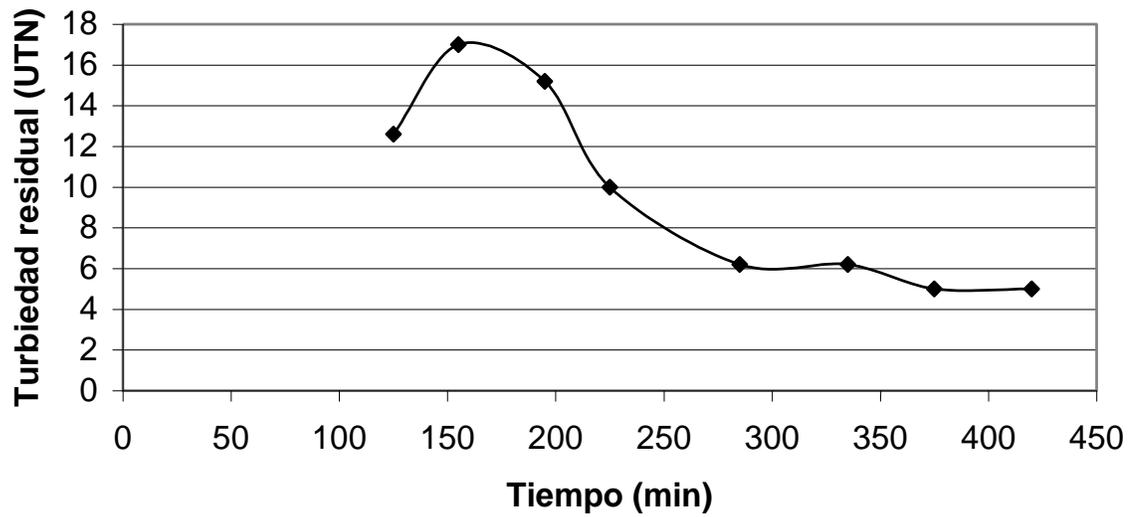
Los resultados se muestran en dos conjuntos de gráficos, figuras 4.15. con cloruro férrico y 4.16. con povimal® cuyos valores numéricos se encuentran en las tablas IV.8. y IV.9. Anexo IV respectivamente.

Con la aplicación de sulfato de aluminio no se presenta gráfica debido a que no se observaron resultados satisfactorios, ya que que no se formaron flóculos y por ende no hay formación del manto de lodo.

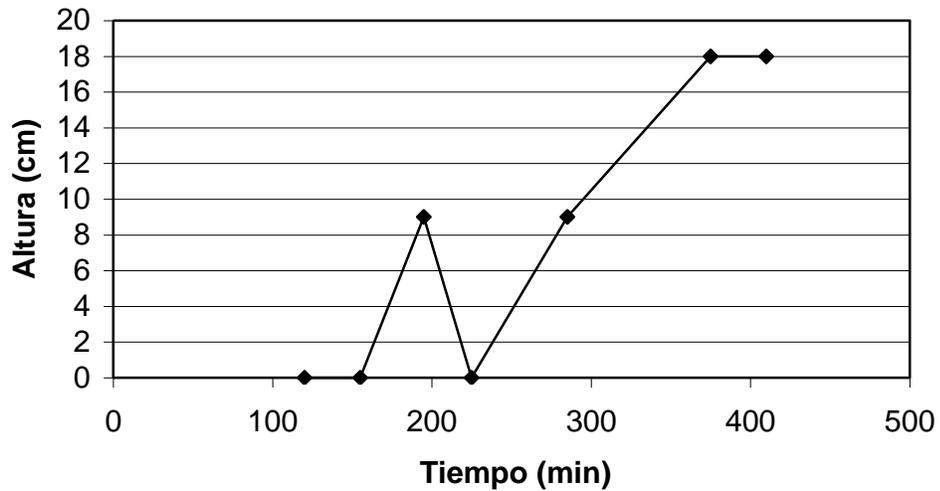
Para la figura 4.15a. la prueba en planta realizada con cloruro férrico, a una dosis promedio de 12 mg/L, indica que se tiene una mejor turbiedad residual a la salida del sedimentador (punto de muestreo No. 14) por debajo de 20 UTN a los 125 minutos de iniciada la prueba, inmediatamente se percibe una fluidización del manto ya que la turbiedad se incrementa a 17 UTN. Posteriormente decrece la turbiedad hasta llegar a 5 UTN a los 375 minutos de prueba manteniéndose constante hasta el final de la prueba 410 minutos.

En lo que respecta al manto de lodo, éste inició a formarse a los 125 minutos con una altura de al menos 9 cm, que desaparece al minuto 200 debido a que se realizó una purga en el manto de lodo. Posteriormente al minuto 300 se incrementa el manto de lodo, alcanzando una altura de 18 cm después de este tiempo, misma que llega a 27 cm al minuto 400.

**A) Comportamiento de la turbiedad residual**



**B) Comportamiento del manto de lodo**



**Figura 4.15. Comportamiento de las variables de proceso en planta con cloruro férrico para agua tipo 2.**

Donde se observa una disminución de la altura del manto de lodo es debida a la variación en el gasto de alimentación, en esta prueba se inicio con 0.7 L/s bajando a 0.4 L/s al minuto 195 y a 0.2 L/s al minuto 285. No es posible controlar el gasto de alimentación, debido a que la bomba baja su eficiencia, la pichancha se tapa o bien a la acumulación de lodo en la tolva inferior es muy alta y esto aumenta la carga a

vencer por la bomba para alimentar agua.

Debido a esta variabilidad en el gasto se realizó una purga de lodo para tratar de evitar que se deposite en la tolva inferior y tener un mayor control sobre la alimentación del sistema.

En la figura 4.16. donde se representan los resultados de una prueba en la planta, en la cual se aplicó povimal® a una dosis de 5 mg/L, se observa el comportamiento de la turbiedad residual (figura 4.16a.); al inicio de la prueba se alcanza una turbiedad residual baja de 7 UTN, (punto de muestreo No. 14 salida del clarificador) pero a los 55 minutos se eleva a un valor de 66 UTN y que a los 90 minutos alcanzó un valor máximo de 96 UTN; esta fluidización no fue posible controlarla, ya que el flóculo era muy ligero, aún cuando a los 30 minutos se realizó una primera disminución del gasto de 1.0 a 0.7 L/s y a los 60 minutos, una segunda reducción de 0.7 a 0.3 L/s. (figura 4.16c.)

Sin embargo a pesar de las dificultades durante la prueba, el manto de lodo se mantuvo entre los puntos de muestreo 4 y 6 (que corresponden al inicio del manto de lodo y 18 cm de altura respectivamente) cuando se presentó la fluidización y después de los 120 minutos se estabiliza en el punto de muestreo No. 6, (18 cm de altura) con lo que disminuye la turbiedad residual a la salida (punto de muestreo No. 14), alcanzando una turbiedad final de 26 UTN. Antes de la última operación unitaria del sistema (filtración).

Es muy posible que aún con el dispositivo de recirculación de lodo, gran cantidad de éste, se acumula en la tolva inferior, y es por esta razón que disminuye el gasto de alimentación.

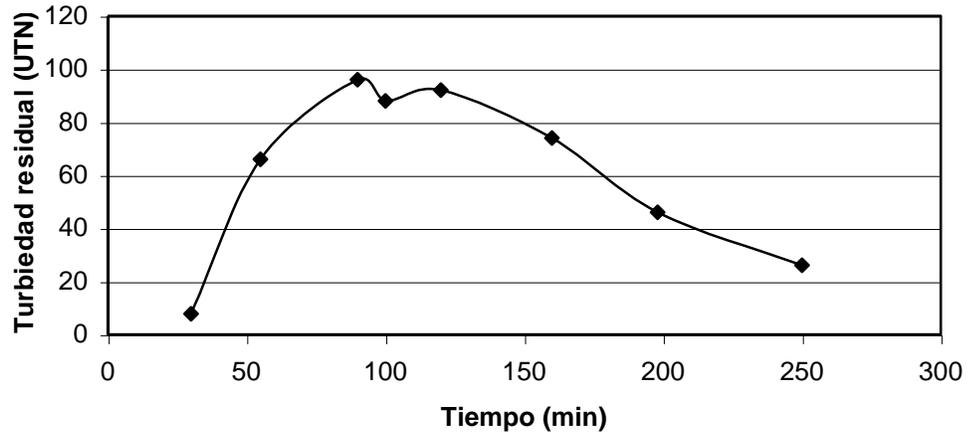
En cuanto al sulfato de aluminio, no se realizó figura sin embargo los resultados que arroja están en la tabla IV.10. del anexo IV, en la que se observa la inexistencia de

flóculo adecuado, con un tamaño muy pequeño provoca que se fluidifique en el sistema sin formación alguna del manto de lodo.

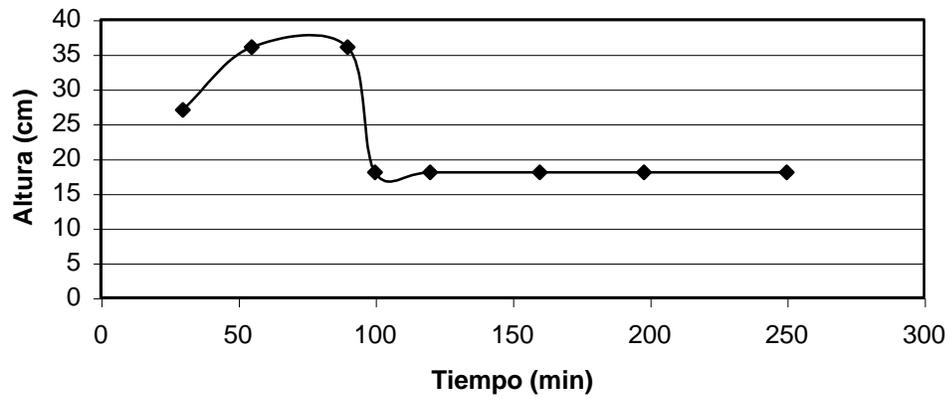
La turbiedad residual a la salida del sedimentador (punto de muestreo No. 14) está entre 56 y 84 UTN, partiendo de una turbiedad inicial de 80 UTN, lo que indica que el sistema no funciona adecuadamente con este coagulante. Sin embargo, no se tiene el control sobre el gasto de alimentación, bajando este de 0.2 L/s, nuevamente por el calentamiento de la bomba o por el taponamiento de la pichancha.

Como se demuestra en las pruebas realizadas anteriormente hay una formación de manto de lodo del cual es necesario conocer las características de los flóculos que lo forman.

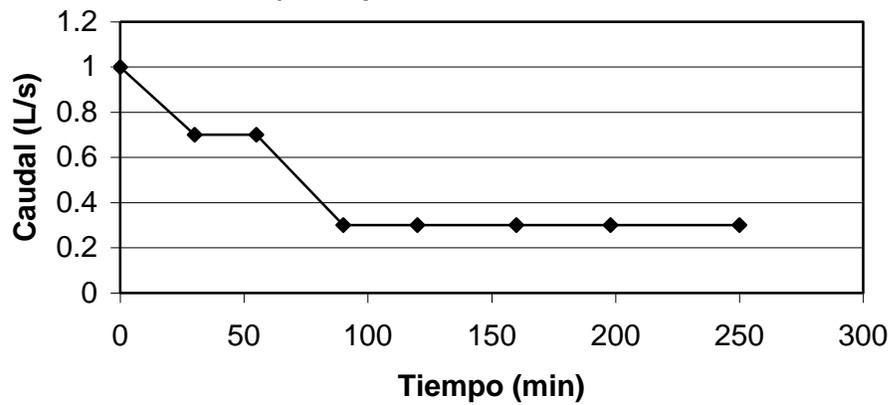
**A) Comportamiento de la turbiedad residual**



**B) Comportamiento del manto de lodo**



**C) Comportamiento del caudal**



**Figura 4.16. Comportamiento de las variables de proceso en planta con povival®.**

#### 4.3.3.2.1. Evaluación de las características de los flóculos que forman el manto de lodo

El lodo generado en pruebas en planta producido con coagulantes cloruro férrico y povimal® fue utilizado para determinar las características de éste, ya que son los que dieron mejores condiciones para la formación del manto de lodo. Las condiciones de pH son las del agua natural (6.9 a 7.8) y las dosis son de 10 mg/L para povimal® y 15 mg/L para cloruro férrico.

No se analizaron los coagulantes: Nalco® 8100 y 8103; debido a que el flóculo formado tiene un índice de Willcomb de 2 a 4 (0.5 – 1 mm), y por tener una baja remoción en turbiedad; en el caso del sulfato de aluminio, se tuvieron resultados adecuados en la remoción, pero el flóculo formado fue muy pequeño (2 a 6 índice de willcomb) y ligero, lo que impide la formación del manto de lodo.

La velocidad de sedimentación para ambos coagulantes son similares a los valores reportados en literatura,  $8.33 \times 10^{-4}$  m/s (2.99 m/h) de (Arboleda, 1993)  $1.69 \times 10^{-4}$  m/s (0.61 m/h) (Miller, 1968), siendo de  $7.79 \times 10^{-4}$  m/s (2.8 m/h) para cloruro férrico y  $9.58 \times 10^{-4}$  m/s (3.45 m/h) Povimal®, esto es indicativo de la formación del manto de lodo en la planta piloto al utilizar estos coagulantes Tabla 4.17.

Comparando estas velocidades con las obtenidas en el apartado 4.2.1. para la zona de cambio de área en el sistema (1.94 – 35.3 m/h) observamos que se encuentran más cercanas al límite inferior para que se establezca un equilibrio y el manto de lodo se forme (2.8 m/h para cloruro férrico y 3.45 m/h para povimal®).

De acuerdo con el índice de Willcomb, el valor alcanzado en pruebas de jarras, es de 8 a 10 para povimal®, 6 a 8 para cloruro férrico, 4 a 6 para sulfato de aluminio, 2 a 4 para Nalco® 8100 y 2 a 4 para Nalco® 8103. De Pádua y colaboradores (2000) reportan, que el cloruro férrico presenta mayor tamaño de flóculo, comparado con el del sulfato de aluminio.

**Tabla 4.17. Resultados de pruebas con lodos.**

Coagulante utilizado			
Parámetro	Cloruro férrico	Povimal®	Literatura
Velocidad de sedimentación	7.79×10 <sup>-4</sup> m/s 2.8 m/h	9.58×10 <sup>-4</sup> m/s 3.45 m/h	8.33×10 <sup>-4</sup> m/s Arboleda 1.69×10 <sup>-4</sup> Miller
Tamaño Índice de Willcomb	6-8 (1 - 2.25 mm)	8-10 (1.5 4.0 mm)	
Constante de cohesión de lodos	0.85 m/h	1.96 m/h	0.8 a 1.2 m/h Degremont (1979)
Composición peso de lodos a 48 h de sedimentación	Agua 67.26 % Sólidos 37.74 %	Agua 81.94 % Sólidos 18.06 %	
Densidad de sólidos	2.1493 g/mL	2.1355 g/mL	2.5 g/mL Valiente (1998)
Sólidos sedimentables	8.5 mL/L	4.9 mL/L	
Sólidos suspendidos	1.9475 g/L	1.8073 g/L	
Gravedad específica	1.2134	1.1486	
Viscosidad calculada al 10% y 30% de sólidos (cp)	1.2525 2.6842	1.2525 2.6842	
Concentración de elemento en el lodo	3331.33 mgFe/kg lodo	4166.66 mgAl/kg lodo	

Una vez determinada la velocidad de sedimentación fue posible calcular el diámetro de la partícula mediante la ley de Stocks, para cloruro férrico el diámetro de la partícula fue de 39.8 μm y para povimal® 47.8 μm, que de acuerdo al índice de Willcomb son superiores. Es importante mencionar que se utilizó el equipo de medición de tamaño de partícula (Coulter Plus LS230), sin embargo, no funcionó debido a que el flujo de trabajo en el equipo es muy alto y rompe los flóculos formados por cualquiera de los coagulantes.

Tambo *et al.*, 1979 reporta un diámetro de partícula de 3.5 a 20 μm en investigaciones donde utilizó sulfato de aluminio y policloruro de aluminio controlando los gradientes y el pH.

Otro de los factores importantes es la constante de cohesión de lodo, lo cual permite determinar, si el flóculo derivado de la coagulación-floculación, cuenta con las características de adherencia, esta constante fue para el povimal® de 1.96 m/h. De

este resultado se desprende que, el valor supera lo reportado en la literatura entre 0.8 y 1.3 m/h Degremont (1979) el incremento de este valor en el povimal® se explica por el hecho de que éste es un gelante y tiene una mayor fuerza de cohesión entre las partículas de flóculo. En el caso del cloruro férrico se determinó que el valor de la constante es de 0.85 m/h, valor que cae, dentro del intervalo recomendado por Degremont.

En cuanto a la densidad de los sólidos obtenida, fue de 2.1355 g/L para povimal® y 2.1493 g/L para cloruro férrico. En un estudio sobre un lecho granular fluidificado que hace las veces de un manto de lodo, Wang y colaboradores (1993a y b), obtienen una densidad de lecho granular de 0.11 a 0.21 g/L trabajando con agua sintética a partir de caolín adicionando a ésta entre 0.3 y 10 g/L de caolín para preparar el agua sintética.

Tambo y colaboradores (1979) reportan una densidad de lodo de entre 1.3 a 3 g/L trabajando con un agua sintética preparada con caolín y utilizando sulfato de aluminio y policloruro de aluminio en dosis de 0.5 a 100 mg/L como aluminio, concluyendo que la densidad decrece al aumentar el tamaño de flóculo. Los valores obtenidos en esta investigación, están dentro del valor reportado por este autor, aunque en el límite inferior.

Por otra parte Knocke y colaboradores (1993), aplicando una metodología que implica diversas velocidades de centrifugación obtienen una densidad de lodo que procede del tratamiento con diversos coagulantes como sulfato de aluminio, cloruro férrico, cal y polímero catiónico (Nalcolyte 8101), obteniendo como resultados densidades de 1.06 hasta 1.9 g/L según el producto químico utilizado.

La cantidad de sólidos suspendidos y sólidos sedimentables obtenida en esta investigación fue de 1.8073 g/L y 8.5 mL/L respectivamente para Povimal® y 1.9475 g/L y 4.9 mL/L para cloruro férrico.

El parámetro de gravedad específica de los lodos se considera de suma importancia en el momento de realizar los cálculos de potencia en las etapas de floculación y sedimentación en la planta piloto, así los resultados de gravedad específica para los lodos producidos en la planta son  $\gamma_{\text{lodo}} = 1.1486$  para el povimal® y  $\gamma_{\text{lodo}} = 1.2134$  para el cloruro férrico.

La viscosidad para los lodos con cloruro férrico y povimal® con un valor de 10% y 30%, de concentración de sólidos en el manto de lodo es de 1.25 y 2.68 cp respectivamente.

De acuerdo a estos resultados que se resumen en la tabla 4.17 aplicando los coagulantes cloruro férrico y povimal®, se puede observar que el cloruro férrico presenta mayor cantidad de sólidos suspendidos, gravedad específica o densidad en comparación con el povimal®, sin embargo, el povimal® presenta un mayor índice de Willcomb (8 – 10) y la constante de cohesión de lodos se duplica (1.96 m/h) con respecto a la del cloruro férrico (0.85 m/h).

La velocidad de sedimentación es mayor en el povimal® pero se equilibra con respecto a la constante de cohesión de lodos, las diferentes características de estos lodos explican el comportamiento del manto de lodo en la planta, sin embargo el comportamiento del manto de lodo esta en función del gasto de alimentación (condiciones hidráulicas del sistema).

#### **4.3.3.3. Resultados de las pruebas en planta para agua tipo 3**

Para este tipo de agua y después de hacer varias corridas y conociendo las características de los flóculos formados de acuerdo al coagulante utilizado, se seleccionaron tres de las pruebas consideradas más completas (mayor tiempo), y con el sistema funcionando en su totalidad (operaciones de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección) aplicando los productos químicos sulfato de aluminio, cloruro férrico y povimal® con dosis de 25, 15 y 5 mg/L respectivamente.

Se presenta una serie de gráficos para cada coagulante, figuras 4.17, 4.18 y 4.19 para sulfato de aluminio, cloruro férrico y povimal® respectivamente, y en forma tabular en los anexos IV.11. IV.12. y IV.13.

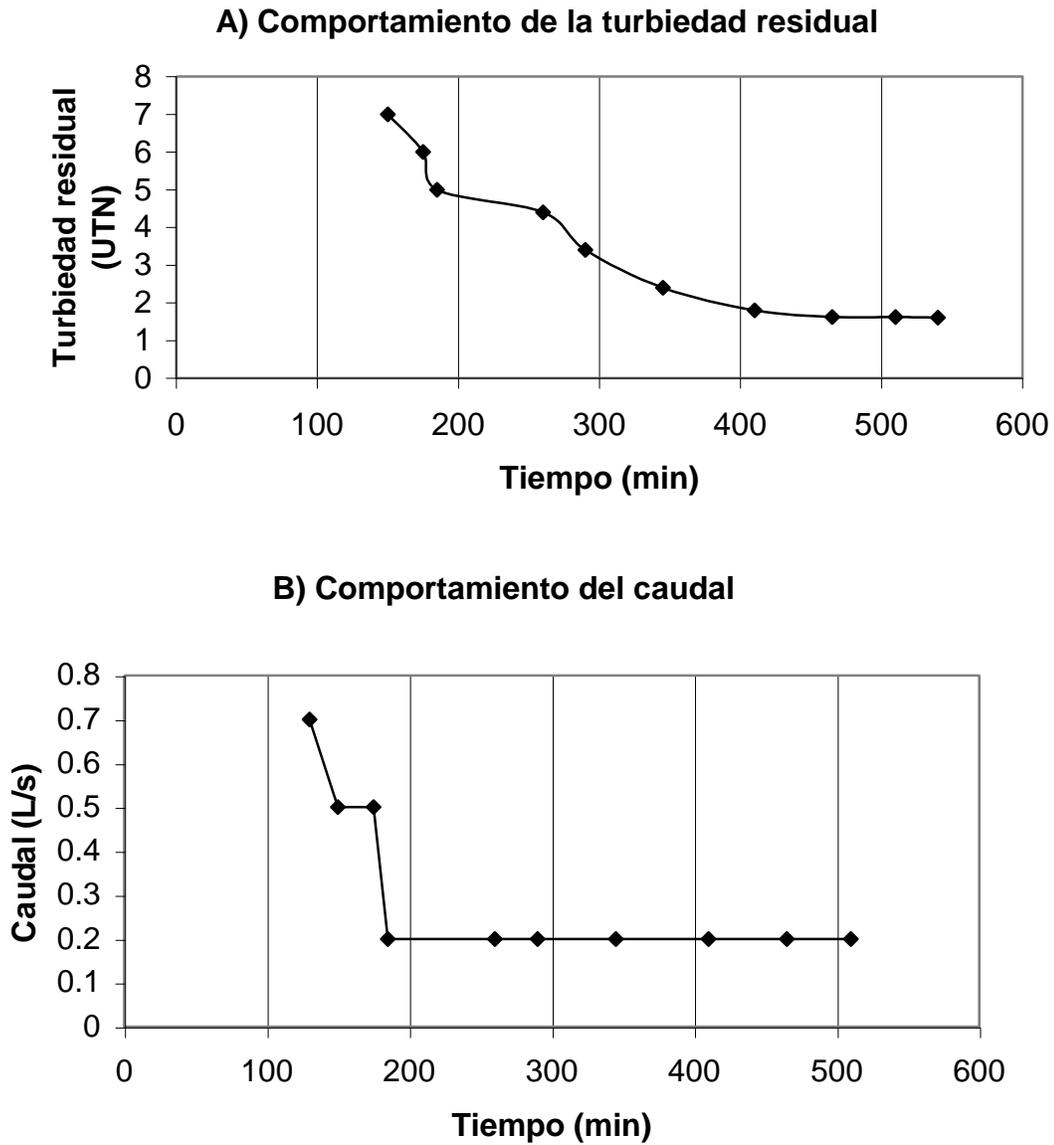
En el caso de la figura 4.17., para el sulfato de aluminio se tiene que de una turbiedad inicial de 210 UTN y después de 150 minutos de prueba, se obtiene una turbiedad residual de 7 UTN misma que después de los 260 minutos se encuentra en 4.4 UTN que está por debajo de lo que marca la norma, la cual continua en descenso hasta 1.6 UTN a un tiempo de 465 minutos.

El gasto de inicio fue de 0.7 L/s, sin embargo, después de aproximadamente 150 minutos de iniciada la prueba este baja a 0.5 L/s y posteriormente disminuye a aproximadamente 0.2 L/s, el manto de lodo se mantuvo en el punto inicial de formación del manto de lodo, punto de muestreo No. 4, lo que indica una posible caída del manto de lodo y la consiguiente acumulación del mismo en la parte cónica inferior de la planta, esto también explica la disminución de gasto al tener que vencer el peso del lodo acumulado en esta sección, otra posible causa es el deterioro de la bomba de alimentación.

Con respecto a la formación del manto de lodo, se aplicó un ayudante de coagulación (povimal® en una concentración de 6 mg/L durante 20 minutos). Como resultado no se observó la formación del manto de lodo.

En cuanto a las etapas de filtración y desinfección observamos una turbiedad que desciende de 62 a 7 UTN al minuto 150 y hacia el final de la prueba, minuto 410 la turbiedad es de 16.4 a la salida del clarificador, bajando a 1.8 a la salida del filtro.

En el caso de la etapa de desinfección se monitoreó cloro residual obteniendo 2.5 mg/L después de 120 minutos de arrancado el sistema. El problema de la variación del caudal es latente ya que esto también explica la baja eficiencia en la formación del manto de lodo.



**Figura 4.17. Comportamiento de las variables de proceso en planta con sulfato de aluminio para agua tipo 3 (povimal 6 mg/L por 20´)**

En cuanto a cloruro férrico figura 4.18, la turbiedad residual después de 100 minutos se encuentra en 1.2 UTN, misma que baja paulatinamente a lo largo de la prueba alcanzando en promedio 0.6 UTN después de los 150 minutos de transcurrida la prueba, y al final de la misma llega a 0.35 UTN al minuto 410.

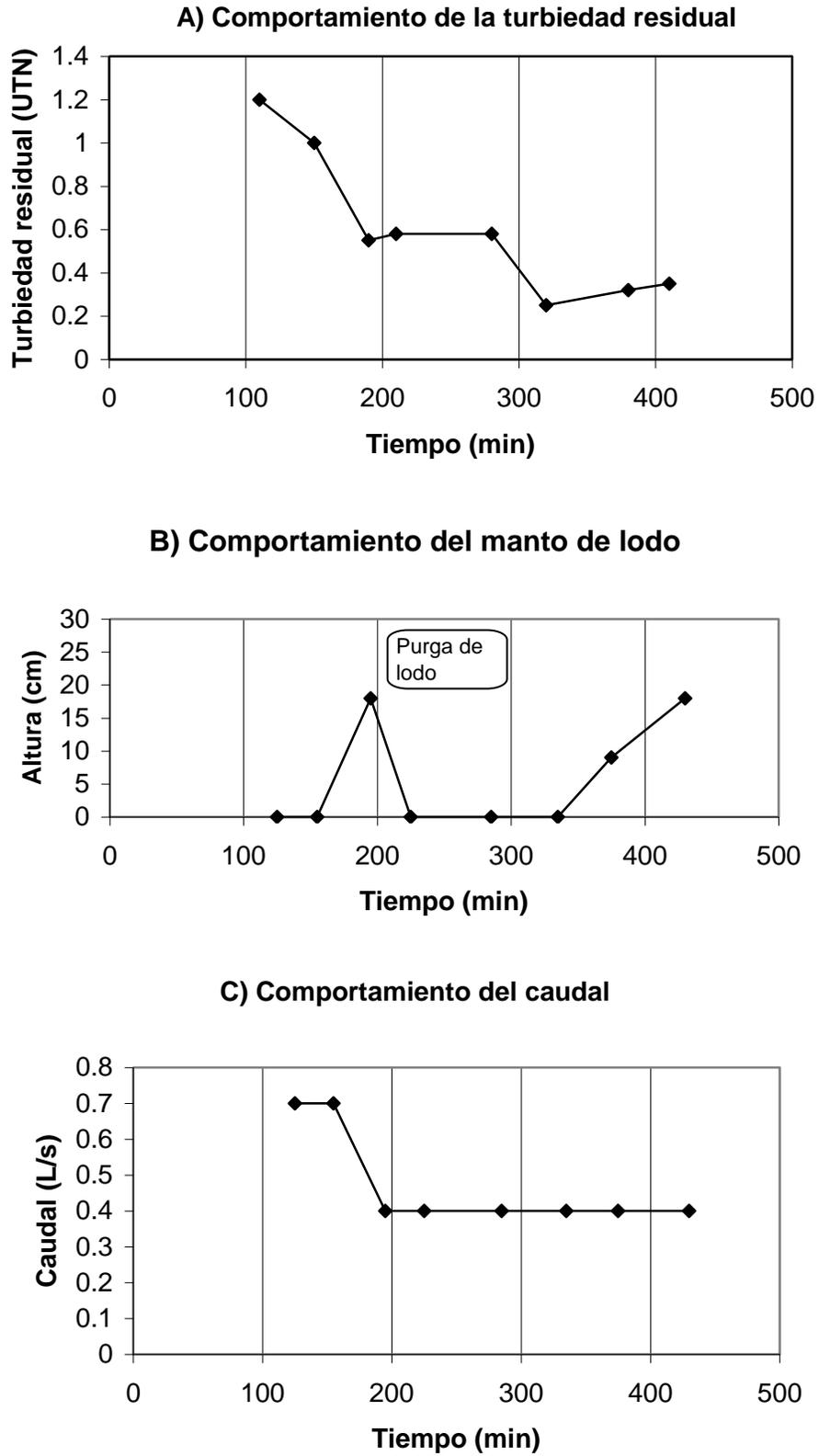
En el caso de manto de lodo se presenta un incremento en el mismo (punto de muestreo No. 5, con 9 cm de altura) y después de un tiempo de 200 minutos se purga el lodo acumulado con el fin de obtener un mayor control en el gasto, ya que este baja considerablemente (de 0.7 a 0.4), después de 340 minutos el manto de lodo aumenta nuevamente, a pesar de la inconsistencia en el flujo de alimentación, no se tiene incremento en la turbiedad a la salida del sistema lo que indica que se presento fluidización en el manto de lodo.

En el caso de povimal® figura 4.19a. la turbiedad residual a partir de los 90 minutos de iniciada la prueba se mantuvo por debajo de la unidad conservándose así hasta el final de la prueba. El gasto también fue más constante manteniéndose entre 0.8 y 1 L/s, como se muestra en la figura 4.19c.

En cuanto a la altura del manto de lodo éste se formó desde el inicio de la prueba, ya que la turbiedad en el punto de muestreo 4 siempre estuvo presente. Al minuto 244 la altura del manto es de 9 cm alcanzando los 27 cm de altura al minuto 429 y 36 cm de altura al minuto 474.

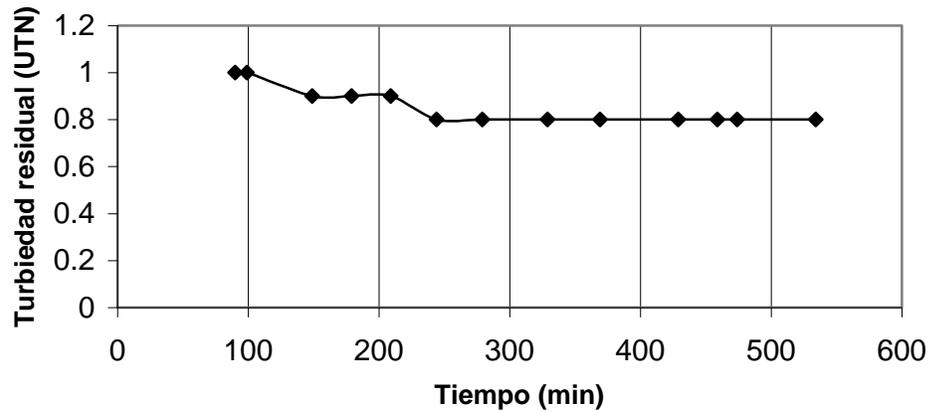
En esta prueba el cloro libre determinado mediante el kit fue de entre 2 y 3 mg/L a tiempo 0 y de 0.5 mg/L a los 30 minutos, aplicando 770 g de cloruro de sodio y 250 g de hidróxido de sodio.

De las tres pruebas anteriores se cuenta con el monitoreo de algunos parámetros en el agua cruda, y agua tratada. Para cloruro férrico solamente del agua cruda y de la salida de la unidad de filtración. Esto se muestra en las tablas 4.18., 4.19. y 4.20. respectivamente.

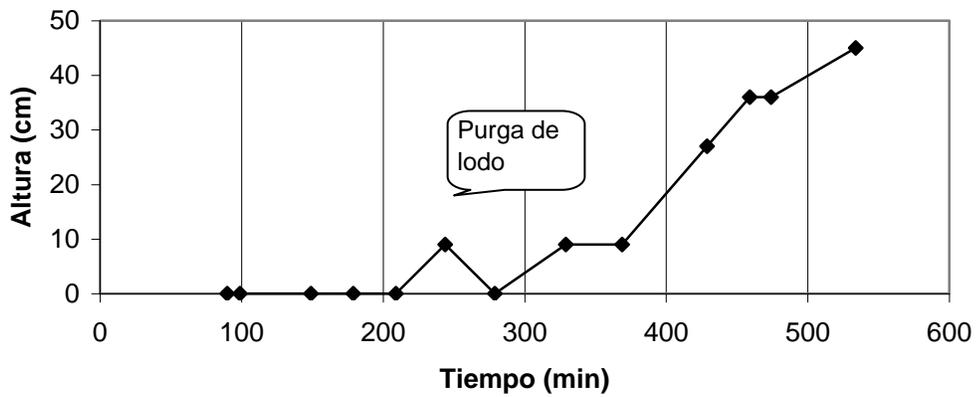


**Figura 4.18. Comportamiento de las variables de proceso en planta con cloruro férrico para agua tipo 3**

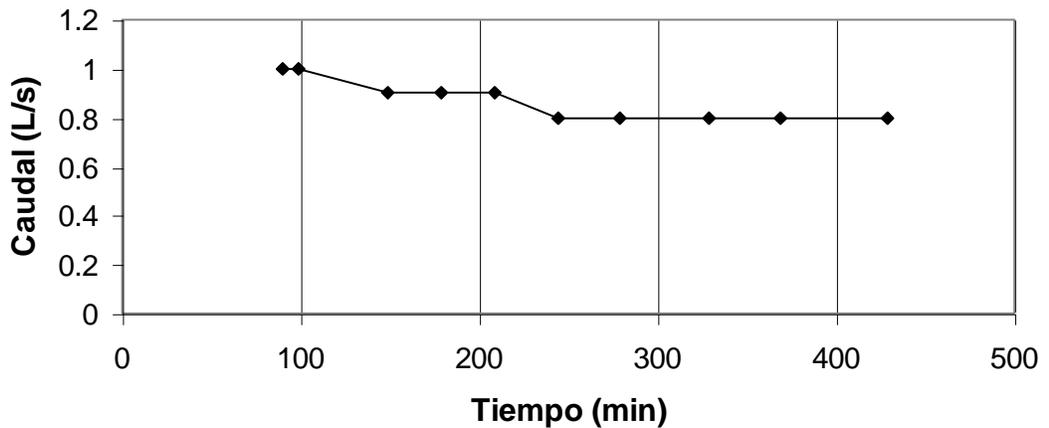
**A) Comportamiento de la turbiedad residual**



**B) Comportamiento del manto de lodo**



**C) Comportamiento del caudal**



**Figura 4.19. Comportamiento de las variables de proceso en planta con povimal® para agua tipo 3**

**Tabla 4.18. Caracterización del agua tratada en planta piloto aplicando sulfato de aluminio (povimal®)**

Parámetro	Influente potabilizadora	Efluente potabilizadora sin cloro	Efluente potabilizadora con cloro	NOM SSA1-127 1994
Color Pt/Co (Hach)	444	63	69	20
pH	8.75	7.69	6.98	6.5-8.5
Temperatura °C	13.0	12.7	13.8	N.A.
Turbiedad UTN	210	2.2	2.0	5
Alcalinidad mg/L CaCO <sub>3</sub>	120.0	218.40	184.80	N.A.
Dureza mg/L CaCO <sub>3</sub>	136.08	164.16	140.40	500
Nitratos mg/L N-NO <sub>3</sub>	0.35	1.22	0.93	10
Nitritos mg/L N-NO <sub>2</sub>	0.007	0.024	< 0.001	0.05
Sulfatos mg/L SO <sub>4</sub>	103.65	116.17	78.62	400
Fosfatos mg/L PO <sub>4</sub>	1.2	0.43	1.21	N.A.
Sólidos totales mg/L	660	530	430	1000
Sólidos totales fijos mg/L	474	344	327	N.A.
Sólidos totales volátiles mg/L	186	186	103	N.A.
Sólidos suspendidos totales mg/L	277	47	20	N.A.
<b>Coliformes totales NMP/100mL</b>	<b>19</b>	<b>&gt; 2400</b>	<b>&lt; 3 NMP/mL</b>	<b>0</b>
<b>Coliformes fecales NMP/100mL</b>	<b>&lt; 3</b>	<b>31</b>	<b>&lt; 3 NMP/mL</b>	<b>0</b>

NA No aplica

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla 4.18, correspondiente a la prueba en planta piloto aplicando sulfato de aluminio (6mg/L de povimal por 20 minutos) , figura 4.17, es importante mencionar que al inicio de la prueba y debido a que no se forma flóculo de tamaño adecuado para dar estabilidad al manto de lodo, se adicionaron 20 mL de povimal® con el fin de formar el flóculo y a su vez que se formara el manto de lodo, además no se controlaron las condiciones hidráulicas debido a que el lodo ligero se depositó en la tolva inferior y el gasto disminuyó a 0.2 L/s.

Como se observa en la tabla 4.18, al tratar el agua, disminuyen algunas de sus características como color (de 444 a 63), pero otras características se incrementan considerablemente como la alcalinidad, debido a la adición del producto químico ya

que contiene hidróxidos, la dureza, los sulfatos y los coliformes totales y fecales. Estos últimos aumentado de 19 a 2400 NMP/100mL y <3 a 31 NMP/100mL respectivamente, de tal manera que al pasar por la etapa de desinfección los valores de coliformes totales y fecales permanecen por arriba de la norma.

El incremento de coniformes en el efluente sin cloro se explica a la falta de limpieza en la planta de la prueba anterior, ya que el lodo se acumula en la tolva inferior y en la zona de sedimentación siendo una posible fuente de nutrientes para bacterias ya que existe nitrógeno y fósforo.

**Tabla 4.19. Calidad del agua tratada en planta piloto aplicando cloruro férrico**

Parámetro	Influyente planta potabilizadora	Efluente planta potabilizadora	NOM SSA1-127 1994
Color Pt/Co (Hach)	2200	14	20
pH	7.75	7.66	6.5-8.5
Temperatura °C	14	14	N.A.
Turbiedad UTN	240	1.40	5
Alcalinidad mg/L CaCO <sub>3</sub>	259.93	239.08	
Dureza mg/L CaCO <sub>3</sub>	220.55	155.34	500
Nitratos mg/L N-NO <sub>3</sub>	1.28	1.20	10
Nitritos mg/L N-NO <sub>2</sub>	0.121	0.016	0.05
Sulfatos mg/L SO <sub>4</sub>	25.7	12.58	400
Fosfatos mg/L PO <sub>4</sub>	1.13	0.98	N.A.
Cloruros mg/L	27.00	18.66	N.A.
Sólidos totales mg/L	1884	364	1000
Sólidos totales fijos mg/L	1692	266	N.A.
Sólidos totales volátiles mg/L	192	98	N.A.
Sólidos suspendidos totales mg/L	1560	0	N.A.
<b>Coliformes totales NMP/100mL</b>	<b>350</b>	<b>&lt; 2</b>	<b>0</b>
<b>Coliformes fecales NMP/100mL</b>	<b>21</b>	<b>&lt; 2</b>	<b>0</b>

Nota: no se realizó la operación de desinfección. NA no aplica

Para la prueba en planta aplicando cloruro férrico, se presentan en la tabla 4.19 los resultados en cuanto a la caracterización de la misma en el efluente con respecto al

agua cruda, de tal manera que el agua efluente cumple con las características fisicoquímicas de acuerdo a la normatividad correspondiente (NOM127-SSA1-1994).

En este caso, no se aplicó la unidad de desinfección debido a problemas con la batería, por lo que para eliminar en su totalidad organismos coliformes totales y fecales se deberá aplicar algún desinfectante al agua.

**Tabla 4.20. Calidad del agua tratada en planta piloto aplicando povimal®**

Parámetro	Influente potabilizadora	Efluente potabilizadora sin cloro	Efluente potabilizadora con cloro	NOM SSA1-127 1994
Color Pt/Co (Hach)	1485	13	1	20
pH	6.8	6.7	6.5	6.5-8.5
Temperatura °C	18	18	18	N.A.
Turbiedad UTN	112	0.4	0.4	5
Alcalinidad mg/L CaCO <sub>3</sub>	168.00	204.00	160 00	N.A.
Dureza mg/L CaCO <sub>3</sub>	114.64	174.25	171.86	500
Nitratos mg/L N-NO <sub>3</sub>	2.05	2.89	2.72	10
Nitritos mg/L N-NO <sub>2</sub>	0.050	0.032	< 0.010	0.05
Sulfatos mg/L SO <sub>4</sub>	< 0.5	19.94	22.90	400
Fosfatos mg/L P	3.72	1.85	1.04	N.A.
Sólidos totales mg/L	752	256	324	1000
Sólidos totales fijos mg/L	574	198	202	N.A.
Sólidos totales volátiles mg/L	178	80	122	N.A.
Sólidos suspendidos totales mg/L	526	6	16	N.A.
<b>Coliformes totales NMP/100mL</b>	<b>900</b>	<b>930</b>	<b>&lt; 3</b>	<b>0</b>
<b>Coliformes fecales NMP/100mL</b>	<b>&lt; 300</b>	<b>40</b>	<b>&lt; 3</b>	<b>0</b>

N.A. no aplica

En el caso del povimal® (tabla 4.20) los parámetros de agua efluente tratada hasta la desinfección cumplen con los parámetros fisicoquímicos de la norma de agua para consumo humano.

Con el fin de comparar la eficiencia en la obtención de la calidad del agua de acuerdo al coagulante empleado, en la tabla 4.21 se presenta un resumen de eficiencias de

remoción por parámetro. Los números negativos indican que se ha incrementado el valor del parámetro por ejemplo la alcalinidad en el efluente tratado con sulfato de aluminio se incremento en un 54%, (en esta prueba se adicionó povimal para tratar de formar partículas que ayudaran a la formación del manto de lodo) esto puede ser debido a la presencia de carbonatos, lo cual se ve reflejado en el incremento de la dureza que se remarca en los casos de utilizar o sulfato de aluminio y povima® (que se incrementan en 3.2% y 49.9% respectivamente). También se atribuye la presencia de magnesio a sales de aluminio, lo cual explicaría el incremento de dureza, sin embargo este parámetro no fue determinado.

Otro parámetro que se incremento son los nitratos, esto en las pruebas donde se aplico sulfato de aluminio y/o povimal® (65.7% y 32.7% respectivamente) de acuerdo a lo reportado en la literatura (Sawyer, 1967, Romero, 1999), la generación de nitratos es a partir de un proceso biológico, por lo que si se observa la generación de estas especies, puede ser debido al residuo que se queda en la planta en la zona de formación del manto de lodo o en la tolva inferior y al ser un lodo que contiene nutrientes existirá generación de bacterias.

La remoción de parámetros como color, turbiedad y coliformes totales y fecales para los tres coagulantes sulfato de aluminio, cloruro férrico y povimal son de 84%, 99.4% y 99.6% respectivamente, sin embargo es importante resaltar que en todos los parámetros fisicoquímicos determinados, la calidad del agua cumple con lo establecido en la normatividad vigente.

En cuanto a los parámetros microbiológicos con el uso del sulfato de aluminio se remueve solo el 84.2%, para el cloruro férrico el 99.4% y para el povima® el 99.6%, por lo que se deberán tomar las medidas adecuadas para el manejo de agua y su almacenamiento, debido a que los microorganismos remanentes tienen las condiciones necesarias para su desarrollo pueden afectar a la población que la consume.

**Tabla 4.21. Porcentajes de Remoción de algunos parámetros medidos de acuerdo al coagulante empleado.**

<b>Parámetro</b>	<b>Efluente tratado con sulfato de aluminio (%)</b>	<b>Efluente tratado con cloruro férrico (%)</b>	<b>Efluente tratado con povimal® (%)</b>
Color Pt/Co (Hach)	84.5	99.4	99.1
Turbiedad UTN	99.0	99.4	99.6
Alcalinidad mg/L CaCO <sub>3</sub>	-54	8.0	4.7
Dureza mg/L CaCO <sub>3</sub>	-3.2	29.5	-49.9
Nitratos mg/L N-NO <sub>3</sub>	-65.7	6.25	32.7
Nitritos mg/L N-NO <sub>2</sub>	85.7	86.7	80
Sulfatos mg/L SO <sub>4</sub>	24.1	51.1	-99
Fosfatos mg/L P	0	13.3	72
Sólidos totales mg/L	34.8	80.7	56.9
<b>Coliformes totales NMP/100mL</b>	84.2	99.4	99.6
<b>Coliformes fecales NMP/100mL</b>	0	90.4	99.0

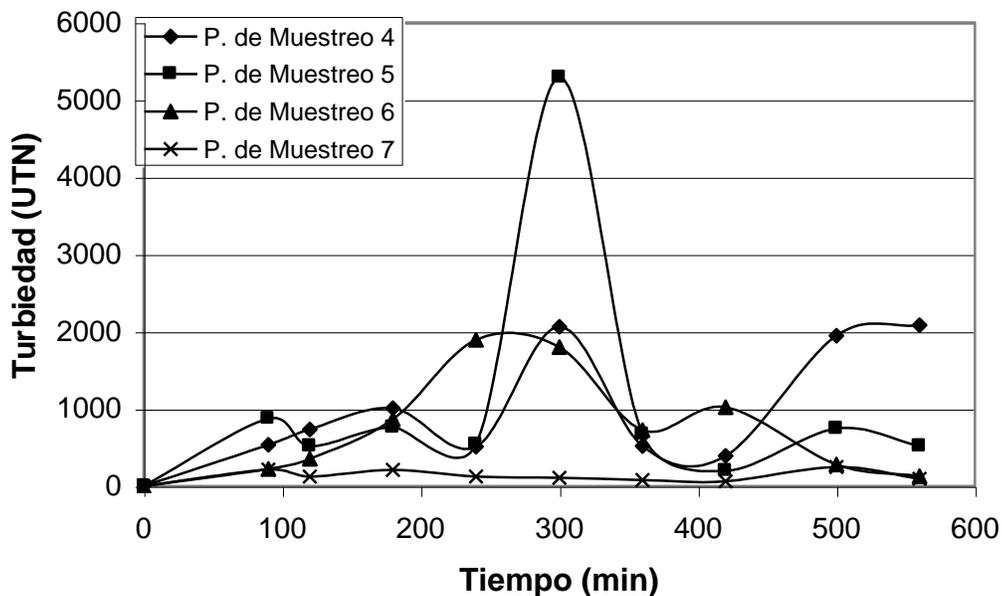
#### 4.3.4. Estudio de la formación del manto de lodo con el agua tipo 3

Posteriormente se corrieron pruebas con el sistema completo con los coagulantes cloruro férrico e hidroxiclорuro de aluminio en los cuales, se evaluó la formación del manto de lodo en cuanto al aumento de la turbiedad con respecto a la altura de éste mismo, determinando turbiedad residual en las tomas de la 4 a la 14 que cubre la zona de formación del manto de lodo y la zona de clarificación, así mismo en los momentos de mayor turbiedad en esta zona, se determinó la concentración de sólidos sedimentables (mL/10mL).

De acuerdo a los resultados obtenidos para la turbiedad residual en los puntos de muestreo 4 a 7 y aplicando cloruro férrico, se observa en la gráfica 4.20. como aumenta la concentración de sólidos desde el inicio de la prueba antes de los 100 minutos ya está formado el manto de lodo con una turbiedad próxima a 1000 UTN en

el punto de muestreo No. 5 que está a 9 cm de altura de la tolva superior de la planta, lo que indica que al menos el manto de lodo tiene este espesor.

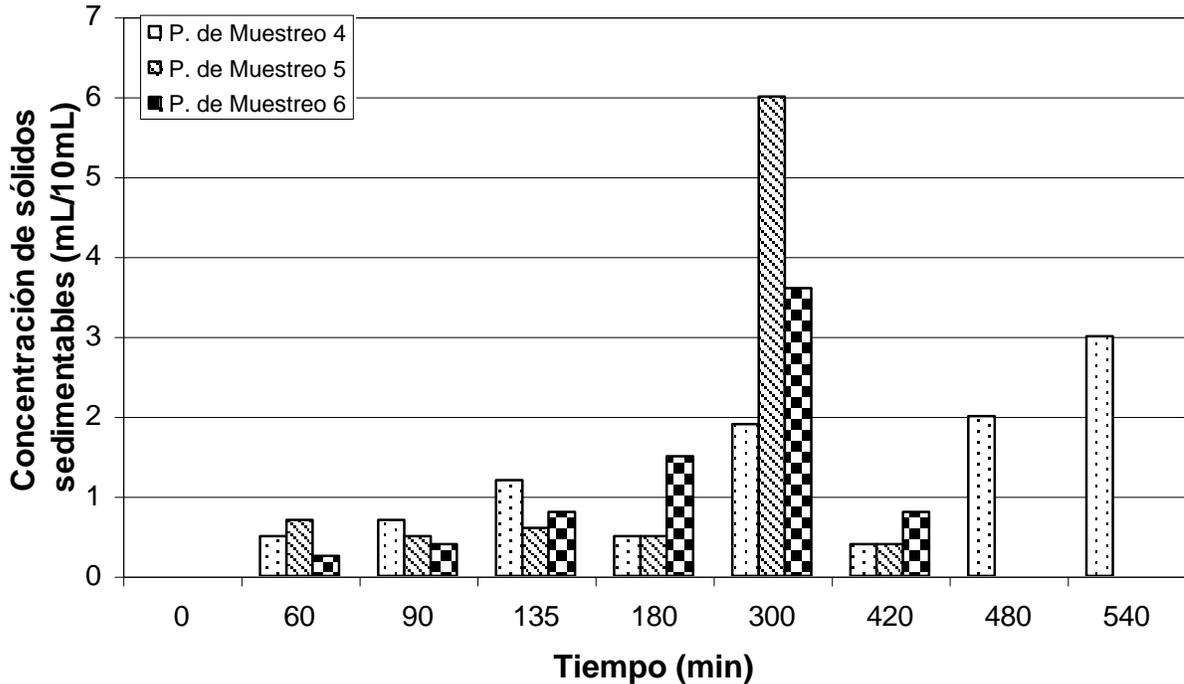
Al minuto 300 la turbiedad en el punto de muestreo 5 aumenta considerablemente >5000 UTN, manteniéndose de un espesor de aproximadamente 18 cm ya que se encuentra hasta el punto de muestreo No. 6.



**Figura 4.20. Turbiedad residual con respecto al tiempo en la zona de formación del manto de lodo ( $\text{FeCl}_3$ ).**

En la figura 4.21 se observa la concentración de sólidos sedimentables (30 min.) con respecto al tiempo de duración de la prueba, observando una correlación en el tiempo para la formación del manto de lodo, ya que al minuto 300 donde la turbiedad residual alcanza su máximo valor (>5000 UTN). La concentración de sólidos sedimentables alcanza un valor máximo 6mL/10mL en el punto de muestreo número 5.

Estas dos determinaciones confirman la formación del manto de lodo entre los puntos de muestreo 4 al 6 teniendo un espesor aproximado de 18 cm durante la prueba.



**Figura 4.21. Concentración de sólidos sedimentables en la zona de formación del manto de lodo ( $\text{FeCl}_3$ )**

En una prueba similar, aplicando hidroxocloruro de aluminio como coagulante, se observa en la figura 4.22. la formación del manto de lodo desde el inicio de la prueba (30 minutos) con una turbiedad de 530 UTN al los 60 minutos, sin embargo la mayor concentración se encuentra en el punto de muestreo número 4 que es donde inicia la inclinación de la tolva superior.

La turbiedad máxima está después del minuto 100 desde el punto de muestreo 4 hasta el 7, lo que indica que el espesor del manto es de al menos 36 cm alcanzando una turbiedad de 4250 UTN en el punto de muestreo No. 4. Figura 4.22.

La concentración máxima de sólidos sedimentables (figura 4.23) es a los 180 minutos a una altura de 18 cm con una concentración de 8 mL/10mL, la cual disminuye debido a que se realiza una purga de lodo con el fin de observar la estabilidad del manto y el efecto de la purga en el agua clarificada.

Para ambas pruebas el decremento de la turbiedad es debido a la purga de lodo en la zona de formación del manto, esto se realizó a los minutos 150 y 180 para cloruro férrico y povimal® respectivamente observando en ambos casos la estabilidad del manto de lodo después de la purga, se observa un pico para el povimal® a la salida del clarificador, debido a la caída del manto de lodo por efecto de la alimentación, ya que momentáneamente se suspendió figura 4.24.

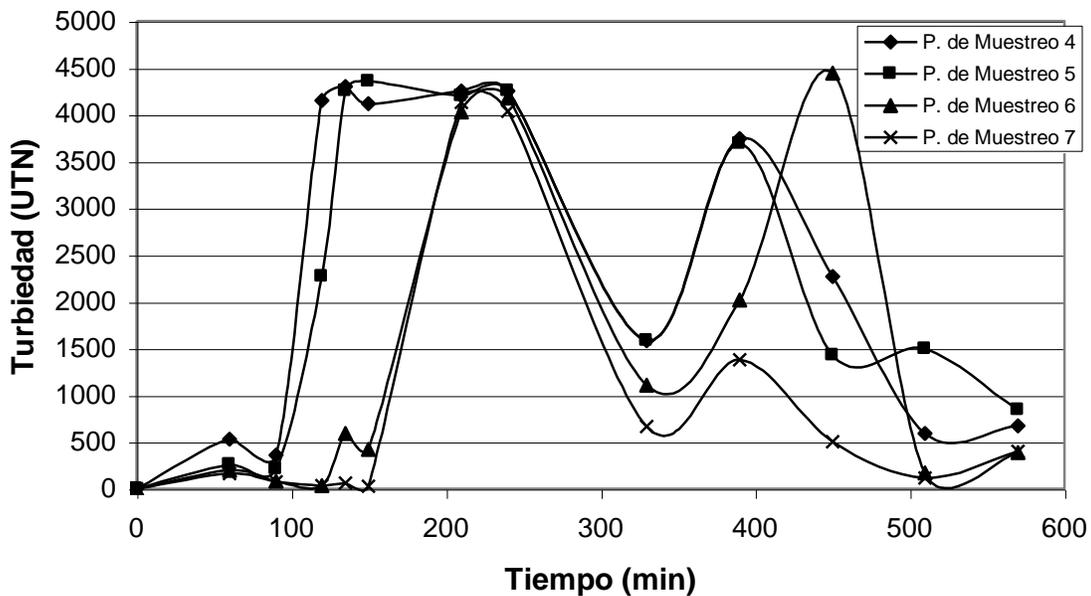
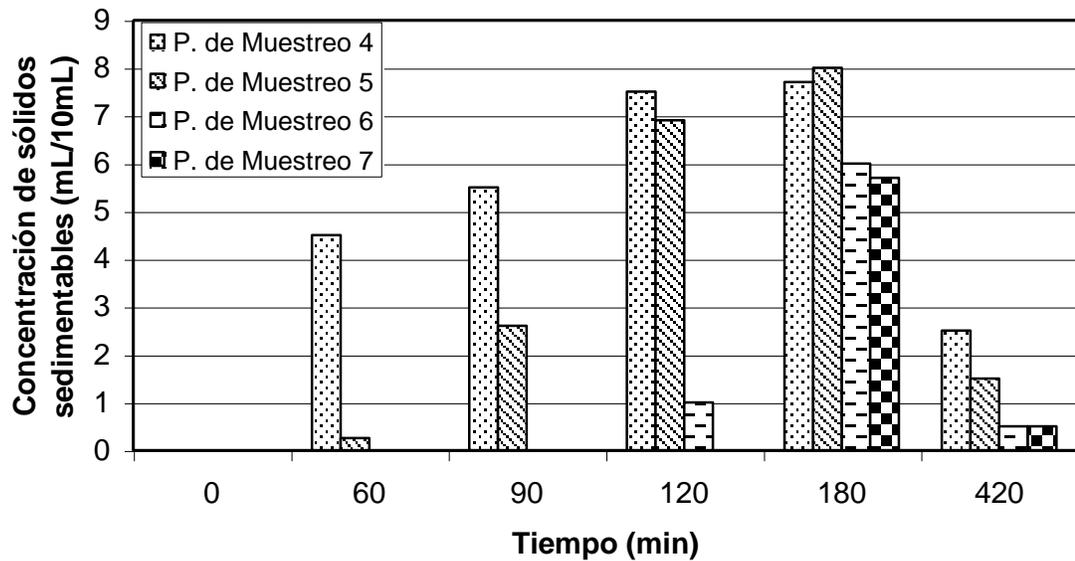


Figura 4.22. Turbiedad residual con respecto al tiempo en la zona de formación del manto de lodo (povimal®).



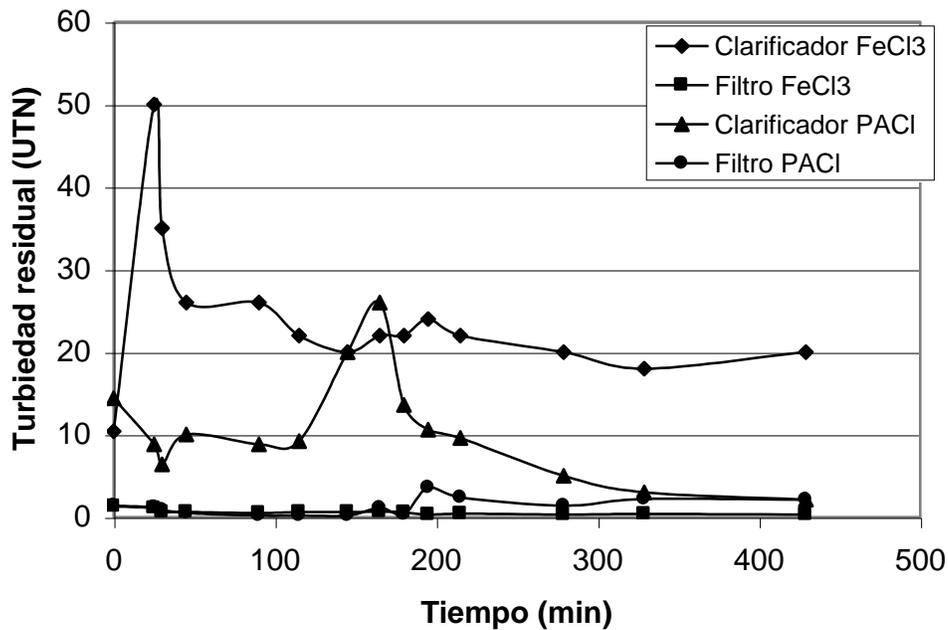
**Figura 4.23. Concentración de sólidos sedimentables en la zona de formación del manto de lodo (povimal®).**

Para ambos coagulantes se presenta en la figura 4.24. la turbiedad residual antes y después de la etapa de filtración, puntos de muestreo 14 y 15, donde se aprecia el cambio de turbiedad residual al momento de realizar la purga de lodo en el punto de muestreo No. 14 (salida del clarificador) en el caso del cloruro férrico, después del minuto 150 la turbiedad aumenta de 20 a 23 UTN en el minuto 200 obtener una turbiedad residual debajo de 20 UTN indicando estabilidad con respecto al tiempo, la turbiedad después del filtro indica que éste esta removiendo con alta eficiencia lo que pasa a través del clarificador, ya que la turbiedad residual en este punto siempre esta por debajo de 3 UTN.

Para el caso del povimal® a la salida del clarificador existe un incremento de la turbiedad residual de 9 a 27 UTN que se reduce al minuto 200 esta por debajo de 10 UTN y prácticamente se iguala con la turbiedad de salida del sistema 3 UTN, por lo que se concluye que la formación del manto de lodo esta en función de las condiciones hidráulicas del sistema, así mismo el filtro cumplió con la remoción de la turbiedad que sale del clarificador.

Se determinó la concentración de aluminio y hierro respectivamente en el agua obtenida de acuerdo al coagulante utilizado, siendo los valores de <math><0.18\text{ mg aluminio/L}</math> para el agua en la que se aplicó hidroxiclورو de aluminio y

En cuanto a la evaluación de la eficiencia de la celda solar se determino durante 5 h en la prueba donde se aplicó clورو férrico, siendo en todos los casos de



**Figura 4.24. Turbiedad residual en los puntos de muestreo 14 y 15, salidas del clarificador y filtro respectivamente**

### **4.3.5. Resultados de la pruebas de filtración en PPP**

#### **4.3.5.1. Evaluación de la tasa de filtración en la PPP**

El valor obtenido de tasa de filtración fue de 72.29 m/d (3 m/h), con un tiempo promedio de filtración de  $\theta_f = 237$  s. Al compararlo con lo reportado en la literatura obtienen tasas de filtración de entre 120 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d, (Romero, 1999), y 120 a 600 m/h DiBernardo (2000) para filtros rápidos, por lo que en este caso la tasa de filtración obtenida se encuentra por debajo de estos valores, concluyendo que no se tiene un filtro rápido.

#### **4.3.5.2. Expansión del lecho filtrante en la PPP**

Esta prueba se determinó con un caudal de 0.75 L/s. De acuerdo a lo descrito en metodología, se indica que se presentó una expansión del lecho de un 20%, de acuerdo a lo especificado en literatura (Pérez, 1992), para filtros de arena fina (diámetro efectivo de 0.45 a 0.55 mm), la expansión del lecho será del orden de 20 a 50%.

#### **4.3.5.3. Lavado del lecho filtrante**

En la figura 4.25 se puede observar como disminuye la turbiedad residual con respecto al tiempo. En ambos casos (repeticiones), se parte de una turbiedad inicial de aproximadamente 80 UTN y ésta baja a 24 y 18.9 UTN respectivamente después de 24 minutos de retrolavado. En la tabla IV.14 anexo IV. se presentan los valores tabulados de la turbiedad residual.

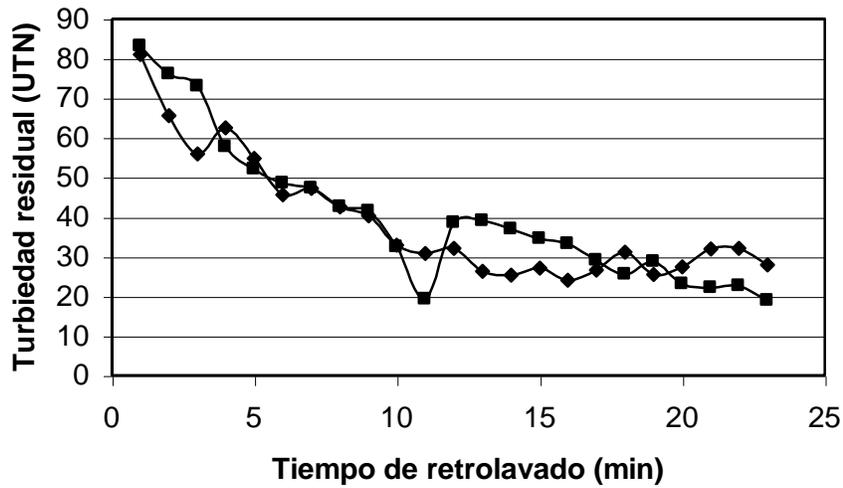


Figura 4.25. Turbiedad residual en el retrolavado del filtro

#### 4.3.6. Tren de tratamiento para diferentes tipos de agua a tratar

Como resumen del tratamiento de potabilización por tipo de agua se presenta mediante un esquema el tren de tratamiento. Para agua tipo 1 sólo se aplican las operaciones unitarias de filtración y desinfección. Para las aguas tipos 2 y 3 se realizó coagulación-floculación-sedimentación (manto de lodo) filtración y desinfección como se muestra en la figura 4.26.

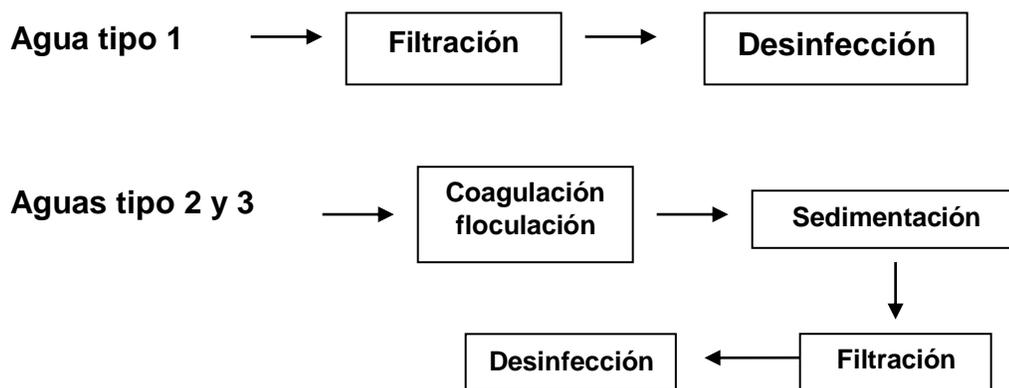


Figura 4.26. Tren de tratamiento por tipo de agua.

La unidad de desinfección presenta una adecuada formación de cloro adicionando entre 600 y 800 g de sal común y 150 g de hidróxido de sodio por día. Para el agua tipo 2 y 3 las dosis recomendadas en planta son de 20 mg/L de cloruro férrico y 5 mg/L de povimal®, en el caso del sulfato de aluminio no se recomienda su uso debido a que el flóculo formado es muy ligero y no se forma el manto de lodo.

## Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

1. De acuerdo a los tipos de agua empleados en prueba de jarras se concluye lo siguiente:

- Agua tipo 1.  
Solo será necesario aplicar las operaciones unitarias de filtración y desinfección
- Agua tipo 2.  
Se podrán utilizar los productos químicos sulfato de aluminio, cloruro férrico o povimal® en dosis de 25, 15 y 5 mg/L respectivamente.
- Agua tipo 3.  
Se utilizarán los productos químicos sulfato de aluminio, cloruro férrico o povimal® en dosis de 25, 15 y 10 mg/L respectivamente, con índices de Willcomb de 4, 6 a 8 y de 8 a 10 respectivamente. No se recomienda el uso de los productos Nalco®.
- Para agua tipo 2 y 3  
No se recomienda el uso de ayudantes de coagulación ya que no presenta mejoras en la remoción de turbiedad comparado con lo obtenido al utilizar el coagulante sin ayudante de coagulación

Son representativos de las dosis óptimas, pH óptimo, y generación de lodo para realizar análisis de los mismos y posteriormente llevar los resultados a la planta piloto, e inclusive se puede disminuir la concentración debido a la recirculación del lodo recién coagulado.

2. En cuanto al cálculo de los parámetros teóricos de operación y diseño para la evaluación de las velocidades en las secciones de cambio de área de la PPP se concluye:

- el intervalo de velocidad se encuentra entre 0.00054 y 0.0098 m/s (1.94 -35.5 m/h), la velocidad de sedimentación de los flóculos formados con cloruro férrico

povimal® son: 0.000779 y 0.000958 m/s (2.8 y 3.45 m/h) respectivamente, lo que cae dentro del intervalo de velocidad para que se equilibren estas velocidades y forme el manto de lodo, sin embargo, por la velocidad de sedimentación de los flóculos el manto de lodo se formará en la parte baja de la zona de formación del manto de lodo.

- En el caso de los valores de las secciones de área constante, de forma general los resultados coinciden con lo recomendado por diversos autores, sin embargo, no es posible obtener intervalos de los parámetros de diseño similares a los reportados en la literatura, debido a que es un sistema de diseño integrado (de diseño novedoso), por lo que los valores serán diferentes.
3. El comportamiento hidráulico del sistema es lo que permitirá la formación del manto de lodo, ya que de acuerdo al gasto de alimentación habrá una variación de velocidades en el sistema, esto llevara a la fluidización de las partículas que conforman el manto de lodo o bien a la caída del mismo cuanto el gasto baje en demasía, por lo tanto se considera un gasto de trabajo de la planta es entre 0.5 a 1.0 L/s
  4. Para las pruebas en planta.
    - Para agua tipo 1 el proceso de desinfección produce una cantidad de cloro, medida como cloro residual en el agua < 3.5 mg/L.
    - La evaluación final de la unidad de desinfección con agua tipo 3 se reporta cero en coliformes totales y fecales monitoreados cada hora durante 5 horas, por lo que se recomienda el uso del sistema de desinfección por su eficiencia y economía.
    - Es necesario dar indicaciones claras del manejo de agua después de tratarla una vez que se instale en una comunidad.

- Para el agua tipo 2 los coagulantes a emplear serán cloruro férrico o povimal®, ya que al aplicar el sulfato de aluminio no se tiene un peso adecuado de flóculo ni las características para la formación del manto de lodo.
  - Para el agua tipo 3 los coagulantes recomendados son el cloruro férrico y el povimal®.
  - El comportamiento más estable se alcanza, operando con cloruro férrico una vez que se analizan todas las variables, la cantidad de lodos generada por el cloruro férrico es del 50% del generado por el povimal®, teniendo mayor compactación y como resultado menor cantidad de agua.
  - El lodo formado con el coagulante sulfato de aluminio no presenta las características adecuadas para la formación del manto de lodo debido principalmente a que es muy ligero.
  - En la etapa de sedimentación por manto de lodo, y con el peso del flóculo formado el sistema actúa adecuadamente, con lo que se espera que el tiempo de permanencia sea mayor debido a que los sólidos son retenidos en el manto formado.
5. En cuanto a la pérdida de carga
- Se considera necesario evaluar las pérdidas de carga con otra metodología, en el caso de las operaciones unitarias de coagulación-floculación-sedimentación y para la etapa de filtración hacerlo cuando el filtro este por colmatarse y por mayor tiempo
  - En la unidades de mezcla lenta segunda etapa y la sección de formación del manto de lodo, se observa una dispersión del trazador obteniendo un tiempo de

retención menor en aproximadamente un 50% del teórico, sin embargo la formación del manto de lodo se produce al tratar el agua.

6. Se presenta una propuesta del manual de operación del sistema, considerando desde el conocimiento del sistema hasta el almacenamiento y manejo de las sustancias aplicadas en la planta pasando por la operación y control así como medidas de seguridad.

### **Recomendaciones**

□ Es necesario establecer el momento de purga de lodos y la eliminación de los mismos en la parte inferior del sistema, o por la purga de lodo. Para esto se recomienda la evaluación con una serie de pruebas de tiempo de operación constante del sistema (24 h por varios días).

Instalar la planta en una comunidad para cumplir su función, considerando una fuente de abastecimiento superficial.

Para cumplir con esto se puede realizar el cambio de materiales (tesis de Licenciatura Martínez 2003). De acuerdo en la zona de construcción de la planta.

## Capítulo 6. Bibliografía

- Amirtharajah A Trusler (1986). Destabilization of particles by turbulent rapid mixing. Journal E. E Division, ASCE 112, 1085.
- Amirtharajah A. and Mills Kirk M. (1996). Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation. Journal AWWA. Research and Technology pp. 210 – 216.
- Andral M. Roger S, Montréjaud-Vignoles and Herremans L. (1999). Particle size distribution and Hidrodinamic characteristics of solid mater carried by runoff from Motorways. Water Environmental Research Vol 71. Number 4. pp. 389 – 407.
- APHA American Public Health Association. American Water Works Association. Water Pollution Control Federation (1992). 18<sup>th</sup> Edition. Standard Methods for examination of water and wastewater.
- Arboleda V., J. Vargas Caballero F. y Correal Correal H. (1969). Manual de tratamiento de aguas potables. Tanques de flujo ascensional. Caracas, Venezuela.
- Arboleda Valencia J., Grinplastch Bernardo Y Kirchmer Cliff (1974). Métodos de evaluación de procesos de tratamiento de agua. Lima, Perú. Junio.
- Arboleda Valencia Jorge. (1993). Teoría y práctica de la purificación del agua. Teoría de la Sedimentación del Agua, Diseño de sedimentadores. Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Arboleda Valencia Jorge. (2000). Teoría y práctica de la purificación del agua. Teoría de la Sedimentación del Agua, Diseño de sedimentadores. Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Segunda Edición.
- Bache David H. and Papavasiliopoulos Eleftherios N. (2001) Viscous behaviour of sludge centrate in response to polymer conditioning. Wat. Res. Vol. 34. No. 1. pp. 354 – 358.
- Barrott L. P., Graham N. J. D. and Lloyd B. J. (1994). Further evaluation of on-site chlorine gas generator (MOGGOD) for small-community water disinfection in developing countries. Journal Water SRT- Aqua. Vol. 43. No. 4. pp. 145 – 153.
- Beard II James D. and Tanaka Theodore S. (1977). A comparison of particle counting and nephelometry. Journal AWWA. October. pp. 533 - 538.
- Bhole A. G. (1982). Design and Fabrication of a low Cost Package Water Treatment Plant for Rural Areas in india. Pp. 315 – 320.

- Brown J. and La Motta E. (1971) Physical behavior of flocculent suspensions in up flow. Journal of the engineering division. April. pp. 209 – 223.
- Brust – Carmona H., Benitez A., Zarco Rabago J., Sánchez E. y Mascher I. (1998). Eficiencia de celdas generadoras de gases oxidantes alimentados con energía eléctrica o solar. Rev Panam Salud pública/Pan Am J. Public Health 3 (2) pp. 111- 116.
- Brust – Carmona H., Juárez J., Díaz J., Vidrio H., y Brust E. (1996). Efectividad del equipo MOGGOD-CEDAT para análisis y desinfección del agua suministrada a una población cautiva en Veracruz, México. Centro de desarrollo y aplicaciones tecnológicas. Oficialia Mayor Secretaría de Salud, México D. F.
- Cailleaux C. Pujol E. Dianous F. and Druoton J.C. (1992). Study of weighted flocculation in view of a new type of clarifier. J Water SRT - Aqua. Vol. 41. No. 1. pp. 18 - 27.
- Camp Thomas R. (1968). Floc Volume Concentration. Journal. June. pp. 656 – 673.
- Clark M. J., Goodrich J. A. and Lykins B. W. (1994). Package plants for small water supplies – the US experience J. Water Supply Research and Technology. Vol. 43 No. 1 pp 23 – 34.
- Clark M. R. (1980). Small water Systems: Role of Technology. Journal of the Environmental Engineering Division. EE1 February pp. 19 – 35.
- Clark M.R., and Morand M. J. (1981). *Package Plants*: a cost-effective solution to small water system treatment needs. Journal AWWA. p.p 24-34.
- Clark R.M., Adams J.Q., Sethi V. and Sivaganesan M. (1998). Control of microbial contaminants and disinfection by-products for drinking water in the US: cost and performance. J. Water SRT-Aqua Vol. 47. No. 6, pp. 255 – 265.
- Collins R.M., Eighmy T T., Fenstermacher Jr. J. M. and Spanos S.K. (1996). Using granular media amendments to enhance NOM removal Jour. AWWA. December pp. 48 – 61.
- Comisión Nacional del Agua. (2001). UPRPS. Situación del subsector agua potable alcantarillado y saneamiento.
- Cornwell D and Bishop M. (1983). Determining velocity gradients in laboratory and full-scale system. Journal AWWA. Water Research and technology. September pp. 470-475.
- Crane (1982). Flow of fluids. through, valves, fittings and pipe. Crane Co.

- Crites R. y Tchobanoglous G. (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Impreso en Colombia.
- Culp G. L. (1984). Handbook. Of Public Water. Cap. 7. Coagulation and flocculation. pp. 174 – 225.
- Dae-Sung Joo, Dong-Jin Choi and Heekyung Park. (2000). Determination of optimal coagulant dosing rate using an artificial neural network. Journal of water supply: Research and Technology-AQUA Vol 49. No. 1, pp. 49 – 55.
- De Luca J. S., Santana A. M. (2000). Hipoclorito generado electrolíticamente *in loco* subproductos e avaliacao de sua capacidade desinfectante no tratamento de aguas. Memorias del XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Porto Alegre Brasil.
- De Padua Valter Lucio, Di Benardo Luiz. (2000). II-019 - Método Comparativo Do Tamanho Dos Flocos Formados Após Coagulacao Com Sulfato de Alumínio e Cloreto Ferrico. XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Porto Alegre, Brasil.
- Degremont. (1979). Manual técnico del agua. Cuarta parte. Cap. 27 Métodos y análisis.
- Di Bernardo Luiz y Di Bernardo Angela S. (1998a). Seminario sobre optimización de plantas de potabilización. Utilización de polímeros sintéticos y naturales como ayudantes de floculación una nueva metodología en base al diagrama de coagulación. Memorias del XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Lima, Perú.
- Di Bernardo Luiz y Di Bernardo Angela S. y Brito Seussy A. (1998b). Optimización de la mezcla rápida tipo de coagulantes químicos. Memorias del XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Lima Perú.
- Fair G. M., Geyer C. J. y Okum D. A. (1987). Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales. Ediciones Ciencia y tecnología.
- Fall Cheickh. (2003). Comunicación personal.
- Fernández Villagomez G. (1990). Química Ambiental. Manual de prácticas. Facultad de Ingeniería DEPI.
- Fogler Scott. (2001). Elementos de Ingeniería de las reacciones químicas. Tercera Edición. Prentice Hall. Capítulo 13.
- Gallard H. and Guten U. (2002). Chlorination of natural organic matter: kinetics of chlorination and of THM formation. Water Research. 36 pp. 65 – 74

- Galvin Marin R. (1992). Lamella clarification in floc blanket decanters- a case study. J Water SRT – Aqua. Vol. 41. No. 1. pp 28 - 32.
- Garrido Hoyos S., Chávez Guerra C. and Pavón Silva T. (2001) Specialised Conference Sludge Management IWA. Acapulco México.
- Geering Fredy. (2000). Top quality drinking water treatment through low investment and operation cost. Journal of water supply: Research and Technology-AQUA Vol 49. No. 1, pp. 35 – 47.
- Gould B. (1974). Hindered settling and sludge blanket clarifiers. Effl. Wat. Treat. J. 14 (3) pp. 131 – 139.
- Gray Kimberly A., Yao Chonghua and O’melia Charles R. (1995). Inorganic metal polymers: preparation and characterization. Journal AWWA. April. pp. 136 – 146.
- Greenberg E. Arnold. (1981). Public Health aspects of alternative water disinfectants. Journal AWWA Research and Technology. January pp. 31 – 33.
- Gregory R. (1979). Floc blanket clarification. Water Reseach Centre. technical report.
- Grozes Gil, White Patrick and Marshall Matthew. (1995). Enhanced coagulation: its effect on NOM removal and chemical costs. Journal AWWA. January. pp. 78 – 89.
- Haarhoff. J. (1998). Desing of around-the end hydraulic flocculators. J. Water SRT- Aqua Vol. 47. No. 3, pp. 142 – 152.
- Hannah S.A., Cohen J.M. and Robeck G.G. (1967). Measurement of floc Strength by Particle Counting. Journal AWWA. Pp. 843 – 858
- Hargesheimer E., Mctigue Nancy E., Mielke J. Laurie, Yee Phillip and Elfort Tom (1998). Tracking filter performance with particle counting. Journal AWWA. Vol. 90. No. 12. pp. 32 – 41.
- Head Richard, Hart Jem and Graham Nigel. (1997). Simulating the effect of blanket characteristics on the floc blanket clarification process. Water Science Technology. Vol. 36. No. 4. pp. 77 – 84.
- Hofkes E. H. (1998). Sistemas de abastecimiento de aguas para pequeñas comunidades. Centro Internacional de Agua y Saneamiento. Documento Técnico 18. Noviembre.
- Hudson E. H. Jr. (1965). Physical Aspects of flocculation. Journal AWWA. July. Vol. 57. (2). pp. 885 – 892.

- Hudson H. E. Jr. and Worfner J. P. (1967). Design of Mixing and flocculating Basins. Journal. October. 59.
- Hudson Jr. H. ER. (1973). Evaluation of Plant Operating and Jar-Test Data. Journal AWWA Water Technology Quality. May pp. 368 – 375.
- Ilagorre Ramírez Raúl y Rivas Martínez Javier. (2002). Desarrollo de un Software de adquisición de datos y control para instrumentos de investigación en tratamiento de aguas y estudios ambientales (AdquiData-UAEM). Tesis. Ingeniería en Computación UAEM.
- INEGI. 2000. XXII Censo Nacional de Población y Vivienda. Por los Estados Unidos Mexicanos.
- Ives (1968a) Theory of operation of sludge blanket clarifiers. Proc Inst. Civ. Engrs. 39, pp. 243 – 260.
- Ives K. (1968). Theory of filtration, special subject, No. 7 Proc. International Water supp. Cong Exhib, Vienna. Pub. Onternat. Assco. 34 Park St., London W.1.
- Kawamura Susuma. (2000). Initial (flash) mixing by water jet diffusion. Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA. November. pp. 307 – 319.
- Kawamura S. (1996a). Optimización de los procesos básicos del tratamiento de agua. Sedimentación y Filtración: Diseño y Operación. Ingeniería Sanitaria y Ambiental No. 29. Diciembre. pp. 28-37.
- Kawamura S. (1996b). Optimización de los procesos básicos del tratamiento de agua. Coagulación y Floculación: Diseño y Operación. Ingeniería Sanitaria y Ambiental No. 27. Agosto. pp. 44 – 57.
- Kawamura Susuma. (1991). Integrated Design Of Water Treatment Facilities, Design of basic Treatment Process Units. Wiley-Interscience Publicación. New York.
- Kawamura Susuma. (2000). Initial (flash) mixing by water jet diffusion. Journal of water supply: Research and Technology-AQUA Vol 49. No. 6, pp. 3.7 – 319.
- Knocke William R., C, Dishman Michael, Miller Gail F. (1993). Measure of chemical sludge floc density and implications related to sludge dewatering. Water Environment Research. Vol. 65. No. 6. pp. 735 – 743.
- Krnasner Stuart W. and Amy Gary. (1995). Jar-test evaluations of enhanced coagulation. Journal AWWA. October. pp. 93 –107.

- LeChevallier Mark W. and Norton William D. (1992). Examining Relationships Between Particle Counts and Giardia, Cryptosporidium, and Turbidity. Journal AWWA Research and Technology December pp. 54 – 60.
- Leeuwen J. Van. Chow C.W.K., Bursill D. and Drikas M. (1999). Empirical mathematical models and artificial neural networks for the determination of alum doses for treatment of southern Australian surface waters. J. Water SRT-Aqua Vol. 48. No. 3, pp. 115 – 127.
- Leeuwren J. Van, Schell H., BergeM. r, Drikas M. (1997). Comparison of coagulant doses determined using a charge titration unit with a jar test procedure for eight German surface waters. J. Water SRT-Aqua Vol. 46. No. 5, pp. 261 – 273.
- Levenspiel (1972). Chemical Reactor Engineering Second Edition John Wiley and Sons.
- Levenspiel (1987). Ingeniería de las reacciones químicas. Ediciones Repla , S.A. Capítulo 9.
- Matlab (1996). Software de tratamiento de datos, versión estudiantil.
- Matsui Yoshihiko, Yuasa Akira, Furaya Yuji, and Kamei Tasuku. (1998). Dynamic analysis of cuagulation with alum and PACl. Journal AWWA. Vol 90 Issue 10 pp. 96 – 106.
- Matsumoto Tsunao, Martins Guilherme Claudio. (2000a). II-009 – Avaliacao do floculador de manta de lodo acoplado ao decantador de alta taxa utilizando sulfato de alumínio e hidróxido clorto de alumínio como coagulantes. Memorias del XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Matsumoto Tsunao, Martins Guilherme Claudio. (2000b). II-032. Comportamento do decanto-floculador manta de lodo e decantador de alta taxa no tratamento de agua de abastecimento utilizando sulfato de aluminio e deferentes polielectrolitos. Memorias del XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Porto Alegre Brasil.
- Merkle Peter B., Knocke William, Gallagher Daniel, Junta-Rosso J. and Solberg Todd. (1996). Characterizing filter media mineral coatings using analytical techniques from geological science helps unlock fundamental filtration phenomena. Journal AWWA. December. pp 62 – 73.
- Miller Derek G. and West John T. (1968). Pilot Plant Studies of Floc Blanket Clarification. Journal AWWA. February. pp. 154 – 164.

- Momba Maggy N.B., Cloete T.E, Venter S.N. and Kfir R. (2000). Influence of disinfection processes on the microbial quality of potable groundwater in a laboratory-scale system model. *Journal of water supply: Research and Technology-AQUA* Vol 49. No. 1, pp. 23 – 34.
- Monteagudo J.G., Seco A. and Ferrer J. (1998). Natural organic matter coagulation in Valencia water supply Pilot Plant Studies. *J. Water SRT-Aqua* Vol. 47. No. 4, pp. 199 – 208.
- Mult S. and Knesl B. (1999). Application of a fluidised layer of granular material in the treatment of surface water. Part 1: aggregation efficiency of the layer. *J. Water SRT-Aqua* Vol. 48. No. 1, pp. 24 – 30.
- Mult S., B. Knesl and Polasek P. (2000). Application of a fluidised layer of granular material in the treatment of surface water. Part 2: separation efficiency of the layer. *Journal of water supply: Research and Technology-AQUA* Vol 49. No. 1, pp. 181 – 202.
- Ndiongue Souleymane, Desjardins Raymond and Prevost Michele. (2000). Relationships between total particle count, aerobic spore-forming bacteria and turbidity in direct filtration. *Journal of water supply: Research and Technology-AQUA* Vol 49. No. 2, pp. 75 – 87.
- Niquette Patrick., Prevost Michele., Servais Pierre., Beaudet Jean-Francois, Coallier Josee and Lafrance Pierre. (1998). Shutdown of BAC filters: effects on water quality. *Journal AWWA*. Vol. 90. No. 12. December. pp. 53 – 61.
- NOM-127-SSA1-1994. (1994). Subsecretaria de regulación y fomento sanitario. diario oficial normas oficiales mexicanas, Agua para uso y consumo humano. México.
- Panswad T. and Chan-Narong B. (1998). Turbidity removal by the up-flow pelletisation process for low turbidity water. *J Water SRT – Aqua*. Vol. 47. No. 1. pp. 36 – 40.
- Panswad T. and Polwanich S. (1998). Pilot plant application of a pelletisation process on low-turbidity river water. *J Water SRT – Aqua*. Vol. 47. No. 5. pp. 236 – 244.
- Panswad Thogchai and Areesawangkit Kultida. (2000). Pellet mass loading and pellet retention time for turbidity removal in a pelletisation process. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*. pp. 9 – 21.
- Panswad Thogchai. (2000). Performance improvement of a pelletisation system by pellet recirculation. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*. pp. 329 – 340.

- Pérez Carreón y Cánepa de Vargas (1992). HPE/OPS/CEPIS Programa Regional de mejoramiento de la calidad de agua para consumo humano. Manual IV evaluación. Tomo III: procesos de tecnología convencional.
- Richter Carlos, Perez Carrion J. y Canepa de Vargas I. (1993). HPE/OPS/CEPIS Programa regional de mejoramiento de la calidad de agua para consumo humano. Manual III. Teoría. Tomo I Coagulación, Tomo II Sedimentación.
- Rojas V. Vásquez S. G. (2000). Estabilidad de la solución de hipoclorito generado por electrólisis. Memorias del XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Porto Alegre Brasil.
- Rojas Vargas Ricardo y Guevara Vasquez Sixto. (2000). II-072 - Estabilidad de la solución de hipoclorito generado por electrólisis. Memorias del XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Porto Alegre Brasil.
- Rojas Vargas Ricardo y Guevara Vasquez Sixto. (2000). II-073 - Celdas electrolíticas para la producción de hipoclorito de sodio. Memorias del XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Porto Alegre Brasil.
- Romero Jairo A. (1995) Sedimentación. Acuapurificación Diseño de sistemas de purificación de aguas. Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia.
- Romero R. (2000). Purificación de agua. Editado por la Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero R., Jairo A. 1999. Acuapurificación. 3ª Ed. Editorial Alfaomega. México. p.p. 15, 20.
- Sawyer (1967).
- Sotelo Avila G. (1974). Hidráulica General. Volumen 1 Fundamentos. Editorial Limusa.
- Stanley S. and Smith D. (1995). Measurement of turbulent flow in Standard Jar test apparatus. Journal environmental engineering. December pp. 902 – 910.
- Stumm W. and O'Melia C. R. (1968). Stiochiometry of Coagulation Journal AWWA. May pp. 516 – 539.
- Takacs I., Patry G. G. and Nolasco D. (1991). A dinamyc model of the clarification thickening process. Wat. Res. 25. (10), 1263.

- Tambo N and Wang X. (1993). Control of coagulation condition for treatment of high-turbidity water by fluidized pellet bed separation. *Journal Water ART-Aqua*. Vol. 42 No. 2. pp. 212 - 222.
- Tambo Norihito and Watanabe Yosimasa. (1979). Physical Characteristics of flocs-I. The floc density function and aluminium floc. *Water research* V. 13 pp. 409 to 419.
- Tangerino Edson Pereira, Matumoto Tsunao y Dall'aglio Sobrinho Milton. (1998). Floculador de mantO de lodo asociado a decantador laminar em tratamento de água. *Memorias del XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Lima, Perú.
- TeKippe Rudy J. and Ham Robert K. (1970). Apparatus to examine floc-forming processes *Journal AWWA*. April pp. 260 – 268.
- Tesarik I. (1967). Flow in sludge – blanket clarifiers. *Journal of the engineering division*. December. pp. 105 - 120.
- Valiente Banderas A. (1998). Problemas de flujo de fluidos. *Dinámica de fluidos* editorial Limusa.
- Vidal A. and Diaz A. (2000). High-performance, low cost solar collectors for disinfection of contaminated water. *Water environmental research*. Vol. 72. No. 3. May/June. pp. 271 – 276.
- Vrale Lasse and Jorden M. Roger (1996). Rapid Mixing in Water. *Journal AWWA* January pp. 52 - 58.
- Vosseler I. Parodi O., Preiser K Huacruz J. Y Agredano J. (2000). Investigación de una celda electrolítica alimentada por un sistema fotovoltaico para la desinfección de agua en zonas rurales de México. *Centro de Desarrollo y Adaptación de tecnologías CEDAT*. Secretaría de Salud. México 9 pp.
- Wang X. C., Tambo N. and Matsui Y. (1993a). Kinetic study of fluidized pellet bed processes. I. Characteristics of particle motions. *J Water SRT – Aqua*. Vol. 42. No. 3.
- Wang X. C., Tambo N. and Matsui Y. (1993b). Kinetic study of fluidized pellet bed processes. II. Development of mathematical model. *J Water SRT – Aqua*. Vol. 42. No. 3. pp. 155 - 165.
- Weber-Shirk and Dick R. (1997). Biological mechanisms in slow sand filters. *Journal AWWA*. Vol 89, pp. 72 - 83.

- White M., Thompson J., Harrington G and Singer P. (1997). Evaluating criteria for enhanced coagulation compliance. *Journal AWWA* Vol. 89 Issue 5 pp. 64 – 77.
- Yao C. and O´melia C. (1989). Comparison of aluminium preparation as coagulation in water treatment. *Aqua*. 38: 339.
- Young S., Stanley S. and Smith D. (2000). Effect of mixing on the kinetics of polymer-aided flocculation. *Journal of Water Supply: Research and Technology – Aqua*. Vol 49. No. 1 pp. 1 – 8.

## Anexo I

### Norma 127-SSA1-1994 Valores máximos permisibles para agua destinada a uso y consumo humano

Características bacteriológicas.

El contenido de organismos resultante de examen de una muestra simple de agua, debe ajustarse a la tabla I.1

**Tabla I.1 Caracterización microbiológica**

CARACTERISTICAS	LIMITE PERMISIBLE
Organismos coliformes totales	No detectable NMP/100mL Cero UFC/100mL
Organismos coliformes fecales	No detectable NMP/100mL Cero UFC/100mL

Características físicas y organolépticas

Las características físicas y organolépticas deben ajustarse a la tabla I.2

**Tabla I.2. Caracterización física y organoléptica.**

CARACTERISTICAS	LIMITE PERMISIBLE
Color Olor y sabor	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto. Agradable (se aceptaran aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico)
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométrica (UTN) o su equivalente en otro método.

Características radiactivas

El contenido de componentes radiactivos se expresan en Becquerel por litro (Bq/L) y son:

Radiactividad alfa global	0.1 Bq/L
Radiactividad beta global	1.0 Bq/L

## Características químicas

El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la tabla I.3; los límites se expresan en mg/L, a no ser que se indique lo contrario

**Tabla I.3 Caracterización química del agua**

CARACTERÍSTICA	LIMITE PERMISIBLE
Aluminio	0.20
Arsénico	0.05
Bario	0.70
Cadmio	0.005
Cianuros (como CN <sup>-</sup> )	0.07
Cloro residual libre	0.2-1.50
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	250.00
Cobre	2.00
Cromo total	0.05
Dureza total (como Ca CO <sub>3</sub> )	500.00
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001
Fierro	0.30
Fluoruros (como F <sup>-</sup> )	1.50
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Nitratos (como N)	10.00
Nitritos (como N)	0.05
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6.5-8.5
Plaguicidas en µg/l: Aldrin y dieldrin (separados o combinados)	0.03
Clordano (total de isómeros)	0.30
DDT (total de isómeros)	1.00
Gamma-HCH (lindano)	2.00
Hexaclorobenceno	0.01
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20.00
2,4-D	50.00
Plomo	0.025
Sodio	200.00
Sólidos disueltos totales	1000.00
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	400.00
Substancias activas ala azul de metileno (SAAM)	0.50
Trihalometanos totales	0.20
Zinc	5.00

## Anexo II

### Memoria de cálculo del diseño de la PPP.

Suponiendo una operación con un caudal de  $0.0005 \text{ m}^3/\text{s}$ , una turbiedad del agua cruda de 120 UTN y una dosis de coagulante de 6 mg/L con povimal.

Cálculo de áreas y volúmenes.

**Mezcla rápida;** tubería de sección circular cuyo diámetro es 0.05 m y una longitud de 2.78 m.

$$A = \pi/4(D)^2 \dots\dots\dots(1)$$

$$V = A \times H \dots\dots\dots(2)$$

$$A = 3.1416 \times (0.05/2)^2 = 0.002 \text{ m}^2$$

$$V = 0.002 \times 2.78 = 0.006 \text{ m}^3$$

$$t = V/Q = 0.006 \text{ m}^3 / 0.0005 \text{ m}^3/\text{s} = 12 \text{ s}$$

**Floculación (en su primera etapa)** segunda unidad concéntrica de sección circular de diámetro 0.2 m y con longitud de 1.87 m.

$$A = 0.029 \text{ m}^2$$

$$V = 0.055 \text{ m}^3$$

$$t = 0.055 \text{ m}^3 / 0.0005 \text{ m}^3/\text{s} = 110 \text{ s}$$

En una segunda etapa, una sección cónica de diámetro menor 0.2 m y un diámetro mayor de 1.07 m y una longitud de 0.435 m.

De acuerdo a la figura se tiene:

$$X = Y \text{ por lo tanto}$$

Diámetro

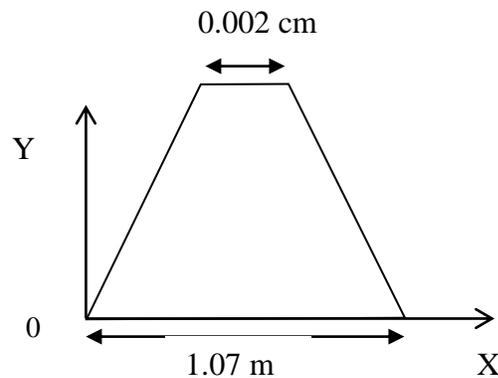
$$D = 1.07 - 2X$$

Área

$$A = \pi/4(1.07 - 2X)^2$$

Si  $X = 0$  se tiene el área menor

Si  $X = 0.4735$  se tiene el área mayor



Dando valores a X se obtiene el área con respecto a la altura en la tolva superior considerada como segunda etapa de la mezcla lenta (unidad de floculación).

X	Floculación segunda sección Área (m <sup>2</sup> )
0	0.904
0.1	0.598
0.2	0.354
0.3	0.174
0.4	0.057
0.43	0.035

El volumen se calcula con la formula del tronco cónico  $V = 1/3\pi h(r^2 + rR + R^2)$   
Aplicando la ecuación anterior se tiene:

$$V = 0.16 \text{ m}^3$$

En la tercera etapa, segunda sección cónica con diámetro mayor de 1.1 m y diámetro menor de 0.04 m y una longitud de 0.535 m. Conocida como **zona de recirculación de lodo** se tiene:

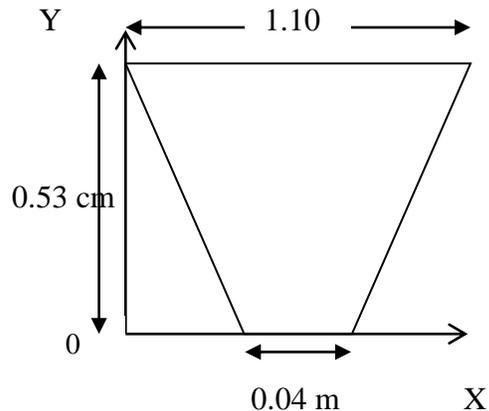
Diámetro

$$D = 0.04 + 2X$$

Área

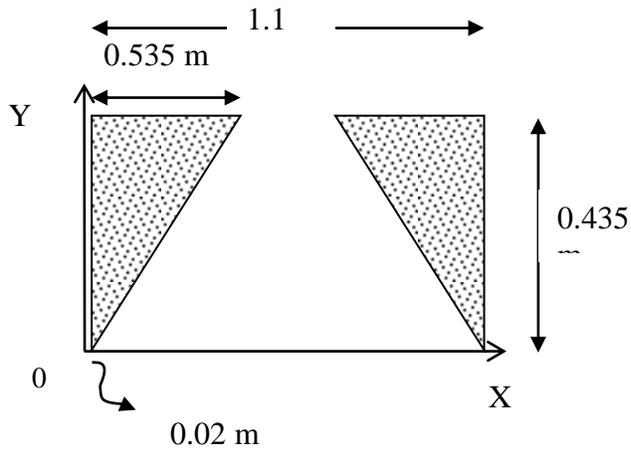
$$A = \pi/4(0.04 + 2X)^2$$

X	Sedimentación tolva inferior Área (m <sup>2</sup> )
0	0.00126
0.1	0.045
0.2	0.153
0.3	0.322
0.4	0.554
0.5	0.849
0.53	0.95



$$V = 0.17 \text{ m}^3$$

Para la **zona de sedimentación** que inicia en la **sección donde se forma el manto de lodos** que es parte de una sección cilíndrica, restringido por una sección cónica interna. La cual se calculó partiendo del siguiente esquema, considerando la parte achurada como la zona de formación del manto de lodos.



De acuerdo a la figura anterior se calcula el área de la siguiente manera

$$A = \pi/4((1.1)^2 - (1.07 - 2X)^2)$$

De acuerdo a la variación de X se realiza el cálculo para las áreas

X	Sedimentación manto de lodos Área (m <sup>2</sup> )
0	0.051
0.025	0.134
0.05	0.213
0.1	0.359
0.2	0.598
0.3	0.777
0.4	0.893
0.43	0.92

El volumen en la ésta sección corresponde a:

$$V = 0.253 \text{ m}^3$$

**La tercera sección** de la zona de sedimentación corresponde a la tercera unidad concéntrica con una longitud de 1.87 m, con un diámetro de 1.1 m, por lo tanto su área y volumen corresponden a:

$$A = 0.92 \text{ m}^2$$

$$V = 1.72 \text{ m}^3$$

$$t = 3440 \text{ s}$$

Para calcular la pérdida de carga de cada una de las secciones

Se realiza el cálculo de la rugosidad relativa para la primer sección que es de 0.05 m de diámetro, 1.97 pulgadas

$$e/D = 1.8 \times 10^{-3} / D = 1.8 \times 10^{-3} / 1.97$$

$$e/D = 9.13 \times 10^{-4}$$

para el de 0.2 m, 7.87 pulg., 1.07 m, 41.73 pulg. y 1.1 m, 43.3 pulg.; da los siguientes resultados.

$$e/D = 2.28 \times 10^{-4}$$

$$e/D = 4.31 \times 10^{-5}$$

$$e/D = 4.15 \times 10^{-5}$$

Determinación del número de Reynolds.

Se considera la viscosidad a 15 °C de 0.00114 kg/ms, la densidad de los sólidos para el caso del povimal, fue determinada experimentalmente dando como resultado  $\rho = 2135.5 \text{ Kg/m}^3$ . Los diámetros son de la tubería y cambian de acuerdo a la sección donde se realice el cálculo y la velocidad depende del área en cada sección.

La formula utilizada es la siguiente:

$$Re = (v)(D)(\rho_{Mez})/\mu_{Mez}$$

Para la mezcla rápida se tiene:

$$Re = (v)(D)(\rho_{Mez})/\mu_{Mez} = (0.25 \text{ m}^3/\text{s})(0.05 \text{ m})(2135.5 \text{ kg/m}^3)/0.00114 \text{ kg/m s}$$

$$Re = 23415.57$$

El factor de fricción para la mezcla rápida se calculó:

$$A' = (2.457 (\ln (1/ (7/Re)^{0.9} + 0.27 e/D)))^{16}$$

$$B = (37530/Re)^{16}$$

$$f_D = 8 ((8/Re)^{12} + (1/(A' + B)^{3/2}))^{1/12}$$

$$A' = (2.457 (\ln (1/ (7/36,944)^{0.9} + 0.27 \times 9.13 \times 10^{-4})))^{16} = 1.14023 \times 10^{20}$$

$$B = (37530/36,944)^{16} = 0.8364$$

$$f_D = 8 ((8/36,944)^{12} + (1/(1.14023 \times 10^{20} + 0.8364)^{3/2}))^{1/12} = 0.026$$

pérdida de carga en el caso de una tubería de diámetro constante, para la mezcla rápida:

$$h_L = f_D \times v^2 \times (L + L_{eq}) / 2 \times g_c \times D$$

$$= 0.026(0.25\text{m/s})^2 (2.78\text{ m} + 0\text{ m}) / 2 \times 9.81\text{ kg}_F\text{ m/kg s}^2 \times 0.05\text{ m} = 0.045\text{ m}$$

La pérdida de carga debida a la presencia de sólidos en el fluido. Para la zona de mezcla rápida se tiene:

$$h_{Lodo} = h_L + (c ((\rho_s / \rho_l) - 1) + 1) L = 0.045 + (0.1 \times ((2135.5/998) - 1) + 1) \times 2.78$$

$$h_{Lodo} = 3.1418\text{ m}$$

Conociendo la pérdida de carga, se puede calcular la potencia disipada:

$$P = \gamma_{agua} v h_L / V = 9798 \times 0.025 \times 3.1418 / 0.005 = 2565.32\text{ N m/s}$$

Para la mezcla rápida, el cálculo del gradiente

$$G = (P / \mu_{agua})^{1/2} = (2565.32 / 0.00114)^{1/2} = 1500.095\text{ s}^{-1}$$

Para el cálculo del número de Camp para la mezcla rápida

$$C = G \theta_0 = (1500.095)(12) = 18001.149$$

Siguiendo el mismo procedimiento se calcularon éstos parámetros para las diferentes secciones de la planta, teniendo variabilidad en las secciones de mayor concentración de sólidos como lo son las tolvas superior e inferior que corresponden a la segunda sección de floculación y la zona de recirculación de lodo recién coagulados, así mismo, la sección donde se forma el manto de lodo.

## Anexo III

### Propuesta de manual de operación y control de la ppp.

#### Contenido

1. Introducción.
2. Procesos de tratamiento.
3. Operaciones de puesta en marcha.
  - 3.1. Inspección preliminar.
  - 3.2. Llenado de la planta.
  - 3.3. Unidad de sedimentación con manto de lodo.
  - 3.4. Unidad de filtración.
  - 3.5. Unidad de desinfección.
4. Operación normal.
5. Procedimientos para efectuar análisis básicos de control de calidad del agua tratada.
6. Sustancias químicas empleadas en la coagulación.
7. Manejo de sustancias químicas.
8. Productos en solución.
9. Datos técnicos de las sustancias utilizadas.

#### 1. Introducción.

En el saneamiento básico rural se tiene contemplada la calidad del agua para consumo humano, ya que esta debe ser tal que no permita enfermedades que afecten la salud y bienestar de la población, sin embargo el costo de una infraestructura adecuada para proveer a la comunidad del vital líquido, en muchas ocasiones puede resultar insostenible, por lo que esta propuesta resulta ser una alternativa en el tratamiento de agua para consumo humano aplicado a comunidades rurales teniendo en cuenta un bajo costo de operación y mantenimiento del sistema, además de su fácil operación.

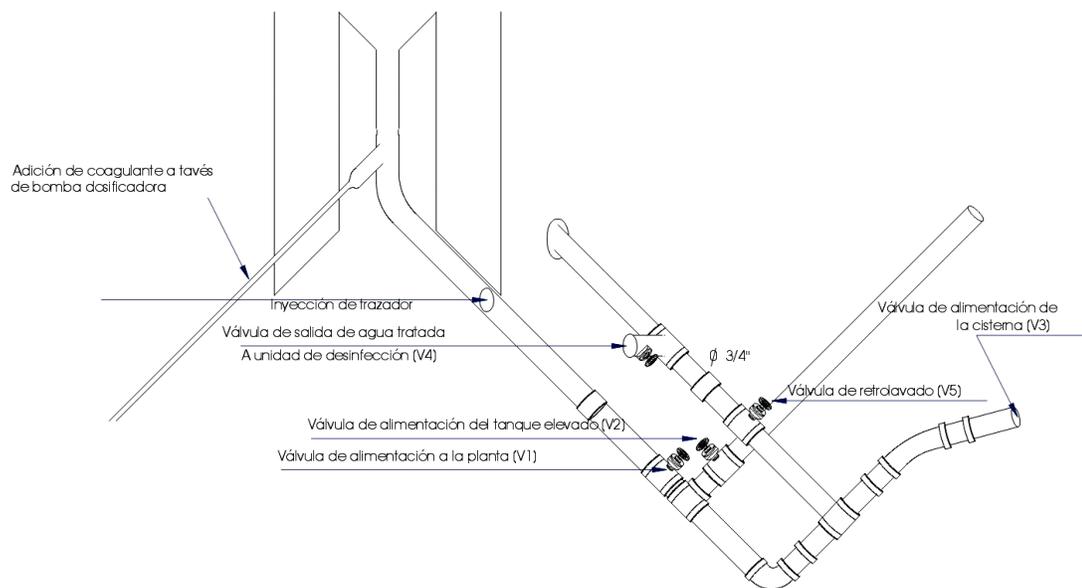
El presente documento tiene como objetivo principal el servir de guía para la operación de la planta de potabilización propuesta para establecerse en una comunidad rural.

El sistema fue diseñado por el Dr. Ignacio Allende Abreu asesor a corto plazo en el Centro Interamericano de recursos del Agua (CIRA). La construcción fue realizada en 1997 por la empresa Fundición y maquinaria del Centro S.A., bajo la supervisión de su diseñador. Una vez terminada fue colocada en el CIRA para la realización de pruebas y optimizar el proceso de potabilización.

## 2. Procesos de tratamiento.

El sistema consiste en lo siguiente:

- Fuente de abastecimiento de agua.
- Tubería de entrada de agua cruda y salida de agua tratada, así como entrada de agua para realizar la limpieza del filtro. Figura M-1.
- Cuatro cilindros uno dentro de otro y de diámetros diferentes para llevar a cabo un mezclado rápido (turbulento), un mezclado lento, la sedimentación y la filtración Figura M-2 vista desde la parte superior de la planta.
- En la parte inferior de la planta, partiendo del segundo y tercer cilindro se cuenta con dos laminas inclinadas en posición encontrada que servirán para provocar un cambio de velocidad en el flujo y hacer que el lodo formado permanezca suspendido en un área determinada de la planta figuras M-3A y B correspondientes a la tolva inferior y superior respectivamente.
- Entre los dos últimos cilindros se encuentra el material filtrante, por el cual pasará el agua en sentido descendente eliminando las partículas que no se han removido en las etapas anteriores.
- Finalmente la unidad de desinfección que se colocara con respecto a la mayor radiación solar para aprovechar su energía figura M-4.
- Tanque de almacenamiento.
- Caseta de vigilancia y control de proceso.



**Figura M-1 Válvulas de entrada y salida de agua a la planta.**



**Figura M-2 Unidades cilíndricas de las que consta la planta piloto potabilizadora**



**Figura M-3A Tolva inferior de la planta piloto potabilizadora.**



**Figura M-3 B. Tolva superior de la planta piloto potabilizadora.**



**Figura M-4 Unidad de desinfección.**



**Figura M-5. Válvulas de muestreo para evaluación del manto de lodo.**

### **3. Operaciones de puesta en marcha.**

Esta actividad se realiza cuando la planta va a empezar a funcionar, y se recomienda la siguiente secuencia de acciones:

Se deberá colocar un rotámetro para medir el flujo de alimentación de la planta ( $Q = 0.5 \text{ L/s}$ ).

#### **3.1. Inspección preliminar, con esto se evalúa el estado de la obra**

- Presencia visual de daños
- Funcionamiento de válvulas y equipos (bombas en caso de existir)
- Existencia de reactivos, materiales y personal para la operación del sistema

#### **3.2. Llenado de la planta**

Operación inicial, Previamente al llenado de la planta deben efectuarse las siguientes labores

- Limpieza general de las estructuras (polvo, grasa, residuos de construcción)
- Calibración de los equipos dosificadores
- Preparación de las soluciones de coagulantes y desinfectantes
- Reconocimiento de los parámetros de control (turbiedad, pH, color, cloro residual)
- Revisión de válvulas

Llenado de la planta, se recomienda el siguiente procedimiento.

- Abrir lentamente la válvula de entrada de agua cruda a la planta V1, manteniendo cerradas las demás válvulas.
- Esperar a que se llene hasta la unidad de clarificación
- Mientras esto sucede aplicar la dosis determinada de coagulante
- Una vez llena la planta verificar la formación de flóculos, en la figura M-2, se observa un chorro ascendente que se forma (fuente) la cual debe de contener una concentración alta de partículas. Así mismo se deberá observar una concentración alta de partículas en la zona de puntos de muestreo figura M-5.
- El agua continúa su trayecto a través del medio filtrante y posteriormente a la unidad de desinfección.

En estas condiciones se deberá mantener la planta por el tiempo determinado para producción continua de agua.

### **3.3. Unidad de sedimentación con manto de lodo.**

- Para verificar la formación del manto de lodo se tomaran muestras en la zona de formación del mismo, realizando el análisis de turbiedad residual, la cual deberá estar en un intervalo entre 3000 y 4000 UTN.
- Aproximadamente después de 3 h de formado el manto de lodo, se deberá realizar la purga del mismo a través de la válvula destinada para este fin, eliminando un volumen de 30 L.
- El lodo será ubicado en un lecho de secado para su posterior disposición.

### **3.4. Unidad de filtración**

Cuando el filtro requiera limpieza, deberá observarse que la velocidad de filtración ha disminuido, lo cual es indicativo de que se requiere realizar una limpieza, para lo cual se procede de la siguiente manera:

Procedimiento de lavado del filtro.

- a. Cerrar la válvula de entrada de agua cruda V1.
- b. La válvula de salida de agua tratada V4 permanecer abierta, ya que será la válvula de entrada de agua de retrolavado.
- c. Abrir la válvula de salida de agua de retrolavado (válvula del punto medio).

- d. Inyectar agua con un gasto de 1.2 L/s para fluidificar el lecho filtrante y generar una fricción entre las partículas del lecho filtrante hasta que se eliminen las impurezas retenidas en el filtro.
- e. El tiempo de retrolavado durará aproximadamente 20 minutos
- f. Se hace una inspección visual del agua de salida de retrolavado para estimar el tiempo en que se deberá detener el retrolavado.
- g. Al terminar el retrolavado, cerrar la válvula de salida de agua de retrolavado.
- h. Al parar la alimentación deberá cerrarse casi en su totalidad la válvula de agua de salida y permitir el flujo de salida de agua permitirá el reacomodo natural de el lecho filtrante.

### 3.5. Unidad de desinfección

Compuesta por dos paneles solares, una batería de auto y la celda electrolítica, se prepara de la siguiente manera:

Antes de la puesta en marcha de la unidad de desinfección:

- a. medir la temperatura de la solución y del ambiente.
- b. Revisar la membrana de la celda electrolítica, si esta contiene depósitos blancos retirar cuidadosamente con una pala de madera cuidando de no romper la membrana.
- c. Agregar sal al compartimiento anódico (+) el cual tiene el electrodo de titanio rubidio (aproximadamente 600 g).
- d. Añadir agua a dicho compartimiento hasta llenar la celda.
- e. Añadir al compartimiento catódico (-) 200 g de hidróxido de sodio, y llenar con agua hasta el volumen indicado.
- f. Conectar la celda a la batería de automóvil.

Nota: Cuidado con cortos circuitos, nunca interconectar los polos de una batería ya que puede quemarse Verificar que la celda este bien conectada Polo positivo de la batería con el ánodo (+) (cable rojo) y el polo negativo (-) con el cátodo (cable negro). Es conveniente contar con dos baterías, ya que si por alguna razón no existe la radiación solar suficiente, la celda electrolítica se alimentará con la energía almacenada en la batería.

- g. Cerrar perfectamente ambos compartimentos de la celda para que la reacción de inicio.
- h. Después de conectar la celda a la batería el cloro gas empieza a generarse en el compartimiento donde se colocó la sal de mesa. **Por ningún motivo debe abrirse este compartimiento, ya que el cloro producido en forma de gas escaparía y es toxico al inhalarlo.**
- i. Las celdas solares deben ubicarse con respecto a la mayor radiación solar y se moverán según convenga.
  - Conectar la salida de la celda de producción de cloro al tubo venturi

Nota: no se deben abrir ninguno de los compartimentos de la celda, ya que el gas generado se escaparía.

Una vez obtenida el agua tratada será recolectada en el tanque de almacenamiento hasta su uso el cual deberá ser suministrado por medio de una llave para evitar contaminación al líquido.

#### 4. Operación normal.

La diferencia con respecto a la puesta en marcha, es que la planta ya contiene agua y las actividades son de tipo rutinario, para esto se inicia la marcha con un caudal menor al gasto de operación  $< 0.5$  L/s, esto con el fin de resuspender el lodo acumulado en la parte inferior de la planta, esto por aproximadamente 15 minutos, posteriormente se trabaja con el gasto de operación de la planta y se espera que se equilibre el proceso después de 30 minutos, el coagulante se adiciona desde el arranque del sistema.

#### Mantenimiento

Una vez tratada el agua por una semana (6 días), se deberá realizar una limpieza completa retirando los residuos de lodo acumulados en la parte inferior de la planta y en la tolva de recolección de lodo, esto con el fin de no generar un foco de contaminación para el agua que se trata en la planta. Misma que quedará limpia para su arranque al día siguiente.

#### 5. Procedimientos para efectuar análisis básicos de control de calidad del agua tratada.

Prueba No. 1. Turbiedad.

Nombre del aparato: Turbidímetro

Unidades: UTN (Unidades de turbiedad nefelométricas)

Frecuencia de muestreo: la turbiedad debe leerse al menos cada hora o cuando ocurren cambios visibles de la calidad del agua cruda que ingresa a la planta.

##### Procedimiento

- a. El indicador de rango del turbidímetro debe estar en la posición 1000.
- b. Revisar que el instrumento este debidamente conectado al tomacorriente. Este equipo esta diseñado para trabajar continuamente y no debe ser desconectado. En caso de falta de fluido eléctrico, debe dar al equipo un periodo de calentamiento de 2 horas.
- c. Limpie la solución patrón de referencia con un papel o toalla no abrasiva y colóquelo en el compartimiento del turbidímetro localizado en la parte superior de aparato.
- d. Coloque la cubierta (cilindro negro) sobre el patrón.
- e. Coloque el indicador de rango en la posición 1.
- f. Utilice el botón “referente adjust” para calibrar el turbidímetro hasta que la aguja del mismo señale el valor del patrón de referencia (1, 10, 100 o 1000 UTN) el aparato está ahora calibrado y listo para leer la turbiedad de la muestra.
- g. Coloque el indicador de rango en la posición 1000 antes de quitar el patrón de referencia. Coloque el patrón en su estuche de protección.
- h. Llene la cubeta de muestra con el agua recolectada. No es necesario llenar totalmente la cubeta. Coloque la cubeta con la muestra en el compartimiento superior del turbidímetro y cúbrala con la cubierta.

- i. Mueva el indicador de rango desde la escala de 1000 hasta la escala que de la lectura mas precisa.
- j. Luego de efectuada la lectura, devuelva el indicador de rango a la posición 1000, remueva la cubeta de muestra, límpiela y guárdela en el estuche respectivo.

Notas:

- ❖ Mantenga la cubierta del turbidímetro siempre en su lugar.
- ❖ Antes de quitar la cubierta, el selector de rango siempre debe de estar en la posición 1000.
- ❖ Dos veces al año, el turbidímetro debe calibrarse con varios patrones. Este procedimiento debe ser efectuado por personal capacitado del laboratorio.
- ❖ Este equipo es altamente delicado. Su revisión interna y mantenimiento solo debe ser efectuado por el personal autorizado para esta labor.

Prueba No. 2 pH.

Nombre del aparato: potenciómetro o pH-metro

Unidades: pH (rango de 0 a 14)

Frecuencia de muestreo: cada hora

Procedimiento

- a. El electrodo debe estar colocado en la terminal respectiva.
- b. Seleccione una solución buffer (pH conocido) con un pH cercano al del agua. La temperatura del buffer no debe diferir en más de 10 °C de la temperatura del agua.
- c. Sumerja el electrodo y un termómetro en la solución buffer
- d. Coloque el selector de función (FUNCTION) en la posición °C y coloque el boton on-off en la posición on. Mueva el control dependiente (SLOPE) completamente en dirección contraria a las manecillas del reloj.
- e. Permita que el electrodo, el termómetro y el buffer alcancen equilibrio térmico (lectura constante en el termómetro) y entonces ajuste el control de temperatura (TEMPERATURE) hasta que sea igual a la indicada por el termómetro.
- f. Determine cual es el pH exacto del buffer (indicado en la botella)
- g. Coloque el selector de función (FUNCTION) en la posición pH y ajuste el botón de calibración (ESTÁNDARIZE) hasta que la pantalla indique el pH igual al del Buffer.
- h. Remueva el electrodo y el termómetro de la solución buffer y enjuáguelos con agua destilada.
- i. Coloque el selector de función en la posición °C y sumerja el electrodo y el termómetro de la cubeta con la muestra de agua.
- j. Permita que el electrodo y el agua de la muestra alcancen equilibrio termal (lectura estable en el termómetro) y entonces ajuste usando el botón de temperatura (TEMPERATURE) hasta que la pantalla del aparato indique la de un valor de temperatura igual al indicado por el termómetro.
- k. Coloque el selector de función en la posición pH y lea el valor del pH en la pantalla digital. Este es el valor correcto del pH de agua.

- l. Remueva el electrodo de la muestra y enjuáguelo con agua destilada. Si se requiere leer el pH de varias muestras, repita los pasos h a l para las muestras faltantes.
- m. Coloque el selector on-off en la posición off después de la última lectura. Es conveniente mantener el electrodo sumergido en agua destilada cuando el equipo no esta en uso.

Prueba No. 3 Cloro residual libre.

Nombre del aparato: comparador de cloro

Unidades: mg Cl<sub>2</sub>/L. (miligramos de cloro por litro)

Frecuencia de muestreo: dos veces al día

#### Procedimiento

- a. Llene una de las cubetas de muestra con agua de la muestra hasta la marca de 10 mL. Colóquela en el compartimiento izquierdo del aparato. Este tubo servirá para compensar color o turbiedad presente en el agua.
- b. Enjuague la segunda cubeta con agua de la muestra y deje una cantidad pequeña de agua apenas suficiente para humedecer la tableta que se agregará.
- c. Agregue una tableta de DPD No. 1
- d. Remueva, llene la cubeta con agua de la muestra hasta la marca de 10 mL y mezcle usando la varilla. Inserte este tubo en el compartimiento derecho del comparador
- e. El disco de comparación debe encontrarse en el aparato. Gire el disco hasta obtener similitud de colore en ambas partes. La lectura de la concentración de cloro libre (mg/L) se efectúa directamente en la abertura localizada en la parte superior derecha del comparador.

#### Notas:

- ❖ Las comparaciones colorimétricas debería hacerse dirigiendo el comparador hacia el cielo, en dirección norte y con la luz diurna. Si se obtiene un color intermedio entre dos posiciones del comparador, estime el resultado interpolando entre los dos valores.
- ❖ Mantenga las cubetas y el comparador siempre limpios.
- ❖ El reactivo utilizado (DPD No. 1) debe ser suministrado por el laboratorio.
- ❖ El disco de color para comparación solo debe limpiarse con papel óptico. Evite otros materiales con el fin de no dañar los patrones de color.

Prueba No. 4 Medición de color

Nombre del aparato: Aqua Tester (comparador de color).

Unidades: Unidades de color (u.c.) escala de platino cobalto.

Frecuencia: 2 veces al día

#### Procedimiento

- a. Asegúrese de que el aparato se encuentra conectado al tomacorriente apropiado. Los tubos Nessler que se encuentran dentro del aparato deben estar limpios y secos.

- b. Llene un tubo Nessler con agua destilada y colóquelo en el compartimiento derecho del comparador. Coloque el tapón respectivo.
- c. Llene el otro tubo Nessler con agua de la muestra y colóquelo en el compartimiento derecho del comparador. Coloque el tapón respectivo.
- d. El disco con los patrones de color debe encontrarse instalado en el aparato. Al rotarse el disco, los números que representan los valores de color aparecen en la ventana circular en el campo de luz.
- e. Rote el disco de color hasta que se obtengan colores iguales en los semicírculos que se observan en la imagen. Pueden estimarse los valores de color intermedios (aquellos que no se ajustan exactamente a uno de los patrones).
- f. Remueva los tubos Nessler y efectúe la limpieza respectiva.

#### Notas

- ❖ Se obtienen mejores comparaciones en cuartos oscurecidos.
- ❖ Apague el equipo cuando no se encuentre en uso.
- ❖ La superficie exterior de los tubos Nessler debe estar limpia y seca antes de introducirse en el Aqua Tester.
- ❖ Enjuague siempre los tubos con agua destilada después de su uso y déjelos secar.
- ❖ No observe a través del visor con el ojo demasiado cerca o por periodos prolongados.
- ❖ El método expuesto mide unidades de color aparente. Si se desea el color verdadero del agua, la muestra debe filtrarse previamente con papel Whatman No. 40.

#### Prueba No. 5 Prueba de jarras.

Nombre del equipo: aparato de prueba de jarras

Frecuencia del Prueba: durante época de lluvias deberá efectuarse un ensayo diariamente o cuando ocurran cambios bruscos de la calidad del agua.

#### Procedimiento

- a. Se toma una muestra de agua cruda (10 L aproximadamente).
- b. Se llenan las 6 jarras del aparato con un litro de muestra cada una.
- c. Se prepara una dosis variable de sulfato de aluminio comenzando con la dosis menor en la jarra No. 1.
- d. Se enciende el equipo de prueba de jarras y con el interruptor en la posición HI se pone a girar a la máxima velocidad.
- e. Se agregan las dosis del coagulante seleccionado y se dejan mezclar por 5 segundos.
- f. Se pasa el interruptor a la posición LO y se deja mezclar el agua (floculación) por 1 minuto a 80 revoluciones por minuto (rpm)
- g. Se disminuye la velocidad a 40 rpm por 5 minutos
- h. Se dejan sedimentar las jarras durante 10 minutos.
- i. Se toma simultáneamente una muestra de cada jarra a una profundidad de 6 cm utilizando un flotador.

- j. Se lee turbiedad, color y pH al agua sedimentada. La dosis óptima es la que produzca la mejor calidad del agua sedimentada en las jarras.
- k. Si es necesario afine la dosis utilizando valores cercanos a la dosis obtenida en j.

## 6. Sustancias químicas empleadas en la coagulación

Un amplio número de plantas de tratamiento de agua para consumo humano utilizan productos químicos que pueden ser de origen natural o sintético, siendo los segundos, los más utilizados como coagulantes primarios.

La Organización Panamericana de la Salud (OPS) ha establecido una serie de recomendaciones para el uso de productos químicos en el tratamiento de agua para consumo humano, dentro de estas se pueden mencionar:

- a) Si se emplean polielectrolitos, será solamente después de cuidadosos estudios sobre posibles riesgos tóxicos.
- b) Al emplearlos, deberá establecerse contacto con un comité nacional apoyado por el Centro Internacional de Referencia para abastecimiento de agua potable de la Organización Mundial de la Salud mismos que serán los encargados de evaluar el riesgo potencial derivado de su uso.
- c) Se deberán establecer los límites máximos de las dosis aplicarse.
- d) El uso de un polielectrolito derivado de la acrilamida, deberá estar apoyado en estudios del metabolismo, mutaciones y teratogénesis de por lo menos tres generaciones.
- e) Establecer un estricto control de calidad del polielectrolito al recibirlo en la planta.

En el Reino Unido, se ha establecido una concentración máxima de acrilamida de 0.25 microgramos por litro basados en un límite de 0.5 mg/d/kg de peso de la persona.

- f) Investigar el tipo y cantidad de subproductos que se estén formando de acuerdo al producto químico utilizado, así como, a los procesos empleados.
- g) Determinar en lodos residuales la concentración de impurezas y subproductos eliminados
- h) Investigar el uso potencial de sustancias naturales que no involucren riesgo potencial a la salud.

## 7. Manejo de sustancias químicas.

Las etapas de manipulación de las sustancias químicas desde su ingreso a la planta son:

- Recepción
- Almacenamiento
- Transferencia
- Dosificación

Las instalaciones en las cuales se desarrollan estas actividades deben diseñarse teniendo en cuenta la forma correcta de manipular las sustancias químicas, de tal forma que se conserven intactas sus propiedades y se facilite la labor de operación en la planta, lo cual redundará en la optimización del proceso de coagulación, que es considerada la operación unitaria de mayor importancia en este tipo de planta de tratamiento.

### Recepción.

Las características de la recepción para la manipulación de las sustancias varían de acuerdo a la forma en que estas lleguen a la planta: sólida, líquida o gaseosa, así como de la presentación de estas: en costales, barriles, tambores, cilindros o a granel. En el caso de los tres primeros la recepción debe disponerse de tal modo que coincida con el nivel de la plataforma de los camiones que transportan este material, evitando así el maltrato o ruptura de los envases por manipulación incorrecta. El traslado de la plataforma del camión se podrá efectuar mediante carretillas. En el caso de obtenerse a granel, del carro tanque o cisterna debe ser transferido a silos de la planta, mediante sistemas mecánicos o neumáticos.

### Almacenamiento

Este ambiente debe reunir características especiales en cuanto a su ubicación y distribución, dependiendo de la naturaleza del producto. La capacidad del almacén debe ser suficiente para abastecer a la planta, por lo menos durante 15 días, este lapso se incrementará en proporción al tiempo que duren los trámites para reponer la existencia del material, hasta un límite aproximado de seis meses.

Cuando se almacenan sustancias secas en costales, estos deberán disponerse en pilas, sobre tarimas de madera, (cuya función es aislar a las sustancias del piso y de las paredes para que no absorban humedad) almacenado en la bodega, lo cual facilitará su utilización por orden de llegada. El material apilado no debe tener más de 2.0 m de alto. Los corredores deben de ser lo suficientemente anchos como para que se pueda transitar con carretillas. Debe manejarse con precaución aquellas sustancias que pueden reaccionar entre sí (como la cal viva y el sulfato de aluminio).

El volumen del material que se debe almacenar se determinará en función de la dosis óptima promedio (D), del caudal (Q) de la planta al final del periodo de diseño, del periodo de almacenamiento (T) en días y del peso específico ( $\rho$ ) de la sustancia química respectiva.

$$V(m^3) = \frac{D \text{ (gr/m}^3\text{)} * Q \text{ (m}^3\text{/d)} * T \text{ (días)}}{\rho \text{ (gr/m}^3\text{)}}$$

La dosis óptima promedio se calcula con base en la dosis máxima, correspondiente a la máxima turbiedad que se presenta en la fuente y que permanece durante un tiempo apreciable, a la dosis mínima correspondiente a la época de estiaje. Estos valores deben extraerse de la curva de dosis óptima *versus* turbiedad del agua cruda, la cual se ha elaborado durante el estudio de laboratorio y que corresponde a cada coagulante empleado.

El área neta que ocupará el material, se obtiene de la expresión:

$$A \text{ (m}^2\text{)} = \frac{V \text{ (m}^3\text{)}}{H \text{ (m)}}$$

En la cual, la altura de almacenamiento (H) depende del sistema de transferencia elegido, el que varía entre 1.80 m (manual) y 3.00 m (mecánico). El área total de almacén debe incluir el área de adición de corredores.

## 8. Productos en solución.

En las instalaciones pequeñas, los reactivos líquidos generalmente se adquieren y almacenan en porrones. Cuando el suministro se realiza en camiones cisterna, en donde son transferidos por gravedad, presión de aire o bombeo a las cubas de almacenamiento, estas deben estar protegidas si es necesario, contra la acción corrosiva del reactivo. Este sistema es muy ventajoso cuando el reactivo en solución se produce localmente.

Las cubas de almacenamiento de los reactivos se construyen, según la naturaleza de los productos:

- De acero o de hormigón, con o sin revestimiento interno
- De material plástico.

Los depósitos de almacenamiento van equipados con dispositivos de medida de nivel, más o menos perfeccionados, que puedan variar desde un sistema de flotador

y vástago con índice que se desplaza sobre la regla graduada, hasta los dispositivos más sofisticados.

#### Proceso de cálculo

Enseguida se ejemplifica un proceso de cálculo de espacio de almacenamiento de sustancias químicas. La información básica requerida es la siguiente:

- Caudal de diseño de la planta (L/s)
- Rango de dosificación (mínimo - máximo) (mg/L)
- Periodo de almacenamiento (días o meses)
- Peso específico del material a dosificar ( $\text{kg/m}^3$ )

#### Impurezas:

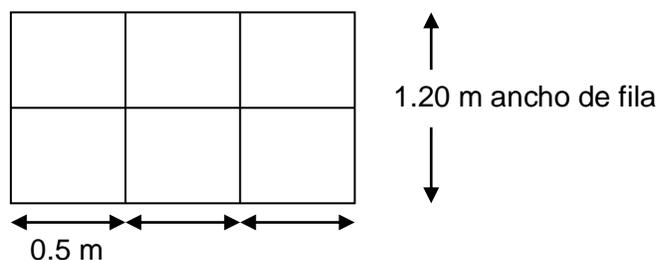
En algunos de los casos será necesario utilizar factores de corrección por impurezas presentes en los reactivos a dosificar. En el caso de sustancias químicas, donde las dosis fueron establecidas con el producto comercial, no será necesario efectuar correcciones. Si se utilizaron grado laboratorio, deberá realizarse el ajuste correspondiente.

#### Ejemplo:

Se desea calcular el área de almacenamiento para sulfato de aluminio requerido para una planta de  $Q = 300 \text{ L/s}$  para un periodo de tres meses. La dosificación requerida es la siguiente:

- D mínima 20 mg/L
- D máxima 80 mg/L
- $\rho = 964 \text{ kg/m}^3$

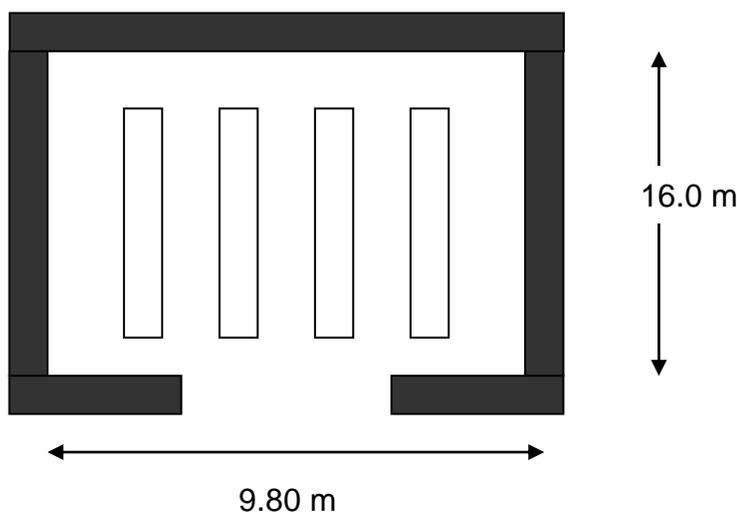
Las fundas normales de 50 kg tienen dimensiones aproximadas de (0.5)(0.6) m de manera que la filas se pueden acomodar de acuerdo al esquema que se muestra a continuación:



## Cálculo de almacenamiento de sulfato de aluminio

Dato	Criterios	Resultado	Observaciones
Dm = 20 mg/L DM = 80 mg/L	$D = (DM + Dm) / 2$	D = 50 mg/L	Dosis promedio
$\rho = 964 \text{ kg/m}^3$ T = 90 días Q = 300 L/s Q = 25920 m <sup>3</sup> /día	$D * Q * T$ $V = \frac{\dots}{\rho \cdot 1000}$	V = 121 m <sup>3</sup>	Volumen de almacenamiento requerido
H = 1.8 m	A = V/H	A = 67.2 m <sup>2</sup>	Área neta de almacenamiento
N = 4 B = 1.20 m	L = A / (B * N)	L = 14 m	Largo de fila de los sacos

Por lo que el espacio requerido será:



Donde el área sobre el rectángulo es donde se colocaran los costales de sulfato de aluminio y el espacio entre ellos es para uso como pasillos.

Transferencia.

El sistema utilizado dependerá del tamaño de la planta y de la forma en la que se recibe el material. Cuando se trata de material envasado, el sistema puede ser manual o mecánico. En el caso de que el material se reciba a granel, los equipos utilizados para el transporte del material son más complejos.

Cuando las sustancias son muy corrosivas, se evitará utilizar sistemas con partes metálicas en contacto con el producto, siendo recomendables en estos casos los sistemas de cintas, o de correas transportadoras.

Dosificación.

La aplicación de las sustancias químicas se efectúa mediante los dosificadores o dispositivos capaces de liberar cantidades prefijadas de productos químicos en una unidad de tiempo de acuerdo a controles del propio sistema.

Para la aplicación de sustancias químicas en polvo, los dosificadores pueden ser volumétricos o gravimétricos. En el caso de sustancias líquidas se determina la dosis midiendo el volumen de material que libera una superficie que se desplaza a velocidad constante.

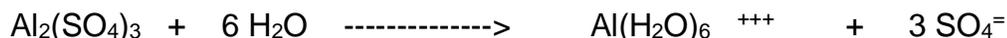
Las sustancias utilizadas como coagulantes en nuestro sistema fueron: sulfato de aluminio, cloruro férrico, Nalco 8100, Nalco 8103, hidroxiclورو de aluminio (Povimal CPL), y coagulantes naturales como el mucílago del nopal, almidón, sustancias extraídas del hueso del tamarindo.

A continuación se mencionan los criterios de manejo de las sustancias químicas susceptibles de ser utilizadas como coagulantes en el sistema de potabilización. Se anexan las hojas técnicas proporcionadas por los proveedores de algunos coagulantes.

## 9. Datos técnicos de las sustancias utilizadas

Sulfato de aluminio

El sulfato de aluminio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$  es un polvo de color marfil, ordinariamente hidratado, que al almacenaje suele convertirse en terrones relativamente duros. Cuando esta en solución se encuentra hidrolizada, esto es asociado con el agua de la siguiente manera



Los iones aluminio hidratados actúan como un ácido y por lo tanto reaccionan con las bases que se encuentran en el agua representadas por las especies hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos.

Formula	$\text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$
Peso molecular:	666.41 g/mol
Presentación	granular, polvo, líquido
Embalaje	bolsas 45 - 90 kg Tambores (158 - 181 kg)
Producido	en planta

Densidad	0.964 - 1.206
Concentración comercial	17 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (min.)

**Forma** **bloques, granular**

Material adecuado para manejo	seco: hierro, acero, plástico. Húmedo: plástico, caucho, acero, cerámica
Solubilidad	5.7 al 17 %.

### Cloruro férrico

El cloruro férrico se consigue en tres formas: como cristales hidratados de color amarillo o café, como cristales anhidros de color verde oscuro, o en solución al 35 o 45 %.

Cualquiera que sea la forma en que venga se aplica en solución del 20 al 2 % de acuerdo al tamaño de la planta y a la capacidad del aparato dosificador. Puede trabajar a un pH bajo o alto de 4 a 11. Los lodos provenientes de la coagulación con hierro son muy corrosivos, tienen un color café oscuro y suelen manchar o teñir los objetos y las corrientes de agua, por lo tanto se debe tener precaución en su manejo.

Formula	FeCl <sub>3</sub> .6 H <sub>2</sub> O
Peso molecular	270.32 g/mol
Presentación	solución, cristales, granulas
Embalaje	porrón (19 L) Tambores (45 y 68 kg)
Densidad	0.96 - 1.04. 0.72 - 0.96
Concentración comercial	35 - 45 %, 60 %, 96 - 97 %
Forma	solución
Material adecuado para manejo	caucho, vidrio, cerámica, plástico
Solubilidad	65 - 91, 75 se disuelve un gramo en 0.25 mL de agua, 1.2 mL de alcohol, se solubiliza en acetona, eter o glicerol

### Povimal CPL

Denominación química: Hidroxicloruro de aluminio o clorohidróxido de aluminio

Formula: Al<sub>2</sub>(OH)<sub>5</sub>Cl·2-3H<sub>2</sub>O

Nombre comercial: Povimal CPL

Aspecto: Líquido transparente, hasta un poco turbio

Propiedades físicas y químicas:

	Masa (%)
PH	3.4
Oxido de aluminio	23.50
Cloruro	8.15
Arsénico	***
Mercurio	***

\*\*\* por debajo del límite de identificación de los métodos químicos corrientes

Almacenamiento: A temperatura ambiente, es estable al almacenamiento. A temperaturas inferiores a 5°C se sobrepasa el punto de vertido o fluidez.

Clase de peligrosidad: nula

Embalaje: Tambores de plástico de 250 Kg  
 Contenedores de plástico de 1350 Kg  
 A granel: pipas de 10 a 25 toneladas

Para el caso de sulfato de aluminio y cloruro férrico, se procederá de la siguiente manera para preparar la solución: Se pesan 100 g y se adiciona agua hasta un volumen de 1000 mL, con lo que se tiene una solución al 10 % que se puede conservar como solución patrón hasta por tres meses, para realizar prueba de jarras a 100 mL de esta solución la llevamos a un volumen de 1000 ml con agua obteniendo así una solución al 1 % que se puede conservar solamente por 24 horas ya que después de este tiempo tiende a hidrolizarse y perder buena parte de su capacidad de coagulación.

Una solución al 1 % (10 g/L) tiene 10,000 mg por 1000 mL, o sea que cada mililitro contiene 10 mg de material.

## Anexo IV.

## Tablas de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados.

Tabla IV.1. Turbiedad residual para dosis óptima de coagulante para agua tipo 3.

Turbiedad residual (UTN)					
Dosis (mg/L)	Nalco 8100	Nalco 8103	Sulfato de aluminio	Cloruro férrico	Povimal
0.5	170	168	N.E.	N.E.	N.E.
1	146	162	N.E.	N.E.	N.E.
2	150	150	N.E.	N.E.	N.E.
3	118	140	N.E.	N.E.	N.E.
4	114	148	N.E.	N.E.	N.E.
5	112	134	34	17	3.2
10	110	126	18	12.8	<b>1.8</b>
15	80	120	14	8.6	N.E.
20	64	72	12	5.8	1.4
25	N.E.	88	<b>10.4</b>	<b>4.6</b>	N.E.
30	N.E.	80	8.6	4.8	1.9
35	N.E.	70	4.6	4	N.E.
40	N.E.	64	4	3	1.3
50	N.E.	N.E.	3.6	2.4	0.82
60	N.E.	N.E.	2	1.8	N.E.
70	N.E.	N.E.	2.6	1.6	N.E.

N.E. No evaluado

Tabla IV.2. Turbiedad residual para pH óptimo de coagulación para agua tipo 2

pH	Nalco® 8100	Nalco® 8103	Sulfato de aluminio	Cloruro férrico	Povimal®
3.5	12	10.2	27.5	11.8	7.5
5.0	13	10.3	28	12.5	5.6
7.9	10.4	11.6	27	8.0	1.6
9.0	14	14.6	31	12.5	3.1
10.0	14.5	10.8	32	4.0	2.8
11.0	N.E.	N.E.	14.8	12.0	5.7

**Tabla IV. 3. Turbiedad residual para pH óptimo de acuerdo al coagulante para agua tipo 3**

Turbiedad residual en (UTN)			
pH	Sulfato de aluminio 25 mg/L	Cloruro férrico 15 mg/L	Povimal 10 ppm
3.5			7.5
4.5	6.4	5.4	
5.5	6	3	5.6
6.5	2.8	4.2	1.6
7.8	5	3.2	3.1
8.9	4	3.8	2.8
9.7	12.8	4.8	5.7

**Tabla IV.4. Porcentaje de remoción con ayudante de floculación para el cloruro férrico.**

Coagulante principal a 10 mg/L de cloruro férrico		
JARRA	ayufloc. / concentración	REMOCIÓN (%)
1	CONTROL	95.5
2	VAFLOC 0.05 ppm	92.7
3	VAFLOC 0.1 ppm	92.7
4	VAFLOC 0.3 ppm	95.5
5	VAFLOC 0.5 ppm	95.5
6	VAFLOC1.0 ppm	93.6
1	CONTROL	95.5
2	8103 0.05 ppm	95.5
3	8103 0.1 ppm	91.8
4	8103 0.3 ppm	94.5
5	8103 0.5 ppm	94.5
6	8103 1.0 ppm	95.4
1	CONTROL	95.5
2	8100 0.05 ppm	90.8
3	8100 0.1 ppm	94.1
4	8100 0.3 ppm	94.1
5	8100 0.5 ppm	96.1
6	8100 1.0 ppm	94.1
1	CONTROL	95.5
2	Mucílago de nopal 60%	78.5
3	Mucílago de nopal 70%	97.8
4	Mucílago de nopal 80%	98.1
5	Mucílago de nopal 90%	96.3
6	Mucílago de nopal 100%	97.1
1	CONTROL	95.5
2	Povimal 1mg/l	95.5
3	Povimal 2mg/l	96.9
4	Povimal 3mg/l	97.9
5	Povimal 4mg/l	98.8
6	Povimal 5mg/l	98.4

**Tabla IV.5. Porcentaje de remoción con ayudante de floculación para el sulfato de aluminio.**

<b>Coagulante principal a 10 mg/l de sulfato de aluminio</b>		
JARRA	ayufloc. / concentración	REMOCIÓN (%)
1	CONTROL	93.9
2	Povimal 1mg/l	95.1
3	Povimal 2mg/l	92.8
4	Povimal 3mg/l	89.3
5	Povimal 4mg/l	89.8
6	Povimal 5mg/l	89.9
1	CONTROL	93.9
2	Mucílago de nopal 60%	92.6
3	Mucílago de nopal 70%	89.7
4	Mucílago de nopal 80%	92.4
5	Mucílago de nopal 90%	92.9
6	Mucílago de nopal 100%	93.9
1	CONTROL	93.9
2	Cloruro férrico 1 mg/L	94.5
3	Cloruro férrico 2 mg/L	94.1
4	Cloruro férrico 3 mg/L	94.1
5	Cloruro férrico 4 mg/L	94.1
6	Cloruro férrico 5 mg/L	95.1

**Tabla IV.6. Caudal a la salida de la fuente.**

Caudal (L/s)	Fuente (cm)
0	0
0.31	3
0.328	2.5
0.42	4
0.475	5
0.512	5
0.528	4.5
0.528	6
0.576	6
0.576	6.5
0.701	7
0.982	10

Tabla IV.7. Altura de la fuente de acuerdo con la alimentación.

Caudal entrante (L/s)	Caudal a la salida de la fuente (L/s)
0	0
0.1	0.29
0.2	0.78
0.3	1.06
0.396	1.31
0.5	1.54
0.6	1.73
0.7	1.87
0.8	2.02
0.9	2.14
1	2.27
1.1	2.40
1.2	2.50

Tabla IV.8. Turbiedad residual de prueba en planta aplicando cloruro férrico para agua tipo 2.

Tiempo (min)	Punto de muestreo No. 2	Punto de muestreo No. 4	Punto de muestreo No. 5	Punto de muestreo No. 6	Punto de muestreo No. 7	Punto de muestreo No.8	Punto de muestreo No. 14	Punto de muestreo No. 15
125	108	196	114	80	66	58	12.6	1.3
155	>200	198	94	50	46	38	17	1.08
195*	>200	>200	186	27	30	29	15.2	0.6
225	>200	182	98	18.2	15.2	18	10	0.64
285**	>200	>200	58	14.8	17.2	16.2	6.2	0.59
335	>200	>200	100	64	10	10.6	6.2	0.31
375	>200	>200	200	8.8	7.4	N.E.	5	0.42
410	>200	>200	200	8.0	7.4	N.E.	5	0.40

\*Purga de lodo, debido a que la fuente solo alcanza 2 cm

\*\*Se considera que el lodo se encuentra en la tolva inferior.

Tabla IV.9. Prueba en planta aplicando povimal para agua tipo 2

Tiempo (min)	Punto de muestreo No. 2	Punto de muestreo No. 4	Punto de muestreo No. 5	Punto de muestreo No. 6	Punto de muestreo No. 7	Punto de muestreo No. 9	Punto de muestreo No. 14	Caudal
0	308	236	270	318	160	140	7	1.0
18	Reducción de caudal a 0.7-0.6 l/s							
30	292	>200	326	244	172	158	7.8	0.7
55	264	240	320	240	240	164	66	0.7
60	Reducción de caudal a 0.2-0.3 l/s							
90	264	304	316	280	206	172	96	0.3
120	254	250	290	196	168	152	88	0.3
0.2-0.3	>200	>200	f.r.	136	106	138	92	0.3
160	>200	>200	260	120	100	110	74	0.3
198	>200	>200	202	40	86	74	46	0.3
215	Aumento de caudal a 0.6-0.7 l/s							
250	>200	>200	70	60			26	0.3

Dosis 5mg/L

Tabla IV.10. Prueba en planta aplicando sulfato de aluminio para agua tipo 2.

prueba # 13. 18 octubre 1999. inicio: 10:20. llenado a 0.5 L/s turbiedad inicial: 80 UTN t Coagulante: sulfato de aluminio; 15 mg/L. duración: 20 y 30 minutos					
Tiempo (min)	Punto de muestreo No. 2	Punto de muestreo No. 4	Punto de muestreo No. 9	Punto de muestreo No. 14	Caudal (L/s)
80	88			56	0.5
120	Caudal 0.2				
140	112	104	160	88	0.2
160	124	120	134	84	0.2

**Tabla IV.11. Prueba en planta aplicando sulfato de aluminio para agua tipo 3. (povimal® 6mg/L)**

prueba # 16. 14 julio 2000. Caudal a tratar: variable L/s; Turbiedad inicial: 210 UTN  
 pruebas en planta Q inicial = 0.7l/s sulfato de aluminio 440g/24L arranque 10:30 h. Tiempo total 9.25 h.  
 Ayudante de coagulación povimal-al 2%; se presentan problemas en el arranque en la formación del manto de lodos por lo que se adiciona 20 mL de povimal a los 24 L iniciales después de 20 min de llenado se vuelve a sulfato de aluminio. concentración: 6 ppm.

*DURACIÓN: 540 MINUTOS*

Tiempo (min)	Punto de muestreo No. 2	Punto de muestreo No. 4	Punto de muestreo No. 5	Punto de muestreo No. 6	Punto de muestreo No. 7	Punto de muestreo No. 9	Punto de muestreo No. 14	Punto de muestreo No. 15	Caudal (L/s)
0									0.7
130									0.7
150	200	56	60	60	60	58	62	7	0.2
175	Paro por pichancha tapada								
185	Arranque Q bajo; ti=120 UTN								
260	>200	98	54		26		32	4.4	0.2
290	>200	60	25.2	19.4	25.4	22.8	25.4	3.4	0.2
345	Q sumamente bajo al parecer el manto de lodos se encuentra por debajo de la toma 4								
345	>200	232	52	30	27.4	25.6	17.6	2.4	0.2
410	>200	222	27.2	21.2	20	18.2	16.4	1.8	0.2
465	>200	208	32.6	18	17.8	18	17.4	1.62	0.2
510	>200	160	21.4	17.4	17	18	15.8	1.62	0.2
540	>200	160	22.2	16.6	16	15.4	15.4	1.6	0.2

Tabla IV.12. Prueba en planta aplicando cloruro férrico para agua tipo 3.

prueba # 10. 14 octubre 1999. equipo lleno. Arranque 8:30 h. caudal a tratar: variable L/s; turbiedad inicial: 170 UTN Coagulante: cloruro férrico; concentración: 4 mg/L duración: 215 minutos									
Turbiedad residual (UTN)									
Tiempo (min)	Punto de muestreo No. 2	Punto de muestreo No. 4	Punto de muestreo No. 5	Punto de muestreo No. 6	Punto de muestreo No. 7	Punto de muestreo No. 8	Punto de muestreo No. 9	Punto de muestreo No. 14	Caudal (L/s)
110	>200	292	146	152	72	54	70	1.2	0.7
150	>200	272	56	72*	64*	36	48	1.0	0.7
190	>200	>200	124	56	24	30	36	0.55	0.4
Purga									
210	>200	125	86	122				0.58	0.4
280	>200	130	55	138	90	54	52	0.58	0.4
320	>200	160.	143	198	148	124	120	0.25	0.4
380		>200	>200	170	152	130		0.32	0.4
410		>200.	>200.	>200	160	129		0.35	0.4

- No se trabajo con medio filtrante

**Tabla IV.13. Prueba en planta aplicando povimal para agua tipo 3.**

Turbiedad inicial: 172 UTN Coagulante: povimal; Concentración: 6 (mg/l) Duración 550 min								
Turbiedad residual (UTN)								
Tiempo (min)	Punto de muestreo No. 4	Punto de muestreo No. 5	Punto de muestreo No. 6	Punto de muestreo No. 7	Punto de muestreo No. 8	Punto de muestreo No. 9	Punto de muestreo No. 14	Punto de muestreo No. 15
99	200	32	24	34	24	14	14.4	1.4
124	200	32	20	26	22	8	8.8	1.2
149	214	36.4	19.6	15.2	15	7	6.4	0.9
179	228	36	30	21.6	20.8	9.2	10	0.5
209	>200	58	17	14.6	15.0	8.2	8.8	0.2
244	160	f.r.	184	232	22.8	10	8.8	0.18
279	>200	184	168	164	16.4	8.8	9.2	0.2
329	>200	>200	58	68	26	22	20	1.1
369	>200	>200	46	46	34	25.2	26	0.34
429	>200	>200	>200	>200	20.6	13.2	13.6	3.6
459	>200	>200	>200	>200	90	13.6	10.6	2.4
474	>200	>200	>200	>200	222	9.8	9.6	1.44
534	>200	>200	>200	>200	208	3.0	5.0	2.2
Celda electrolítica 770 g de cloruro de sodio, 250 g de hidróxido de sodio								
Tiempo (min)	Cloro libre (mg/L)			Cloro libre 30' (mg/L)				
15	2			ND				
40	2.5 - 3			ND				
65	3			ND				
80	3			0.5				
120	3			0.5				
190	3			0.5				
315	2.5 - 3			1				

Tabla IV.14. Retrolavado del filtro

Tiempo	Caudal (6 L/6s)	Caudal (6 L/8s)
1	111	37.2
2	95.5	88.9
3	85.8	103
4	92.5	87.7
5	84.8	82
6	75.5	78.5
7	77.1	77.1
8	72.5	72.5
9	70.3	71.3
10	62.8	62.3
11	60.7	49.2
12	62.1	68.5
13	56.2	68.9
14	55.2	66.9
15	57	64.4
16	54	63.2
17	56.6	58.9
18	61.1	55.5
19	55.5	58.6
20	57.4	53
21	61.8	52
22	62.1	52.6
23	57.8	48.9

## Anexo V.

### Resultados de los análisis de flujos que determinan el tiempo de retención en la PPP.

Distribución de los tiempos de residencia para las diferentes secciones de la planta. De acuerdo a lo establecido en el capítulo 3 en cuanto a las pruebas para determinar los tiempos de retención se presenta un ejemplo de los cálculos realizados con ambas metodologías de inyección de pulso y inyección de escalón positivo.

Inyección de pulso (1 golpe).

En éste método, una cantidad de trazador  $N_o$  se inyecta súbitamente en un único movimiento al influente del reactor, en el tiempo más corto posible midiendo a la salida la concentración en función del tiempo recabando la información para un análisis posterior que indicará la distribución del tiempo de residencia (DTR). La cantidad de trazador que sale del reactor en un tiempo  $t$  y  $t + \Delta t$  es entonces:

$$\Delta N = QC(t) \Delta t \dots\dots\dots(V.1)$$

donde  $Q$  es el caudal con el cual opera el reactor,  $\Delta N$  es la cantidad de material que ha permanecido un tiempo determinado comprendido entre  $t$  y  $t + \Delta t$  dentro del reactor. Dividiendo a la expresión anterior por la cantidad total de de material  $N_o$  que fue inyectada al reactor, se obtiene:

$$\frac{\Delta N}{N_o} = \frac{QC(t)\Delta t}{N_o} \dots\dots\dots(V.2)$$

La ecuación anterior representa la fracción de material que experimenta un tiempo de residencia comprendido entre  $t$  y  $t + \Delta t$ .

**Para una inyección de pulso definimos:**

$$E(t) = \frac{QC(t)}{N_o} \dots\dots\dots(V.3)$$

Así que,

$$\frac{\Delta N}{N_o} = E(t)\Delta t \dots\dots\dots(V.4)$$

La expresión  $E(t)$  se conoce como función de distribución del tiempo de residencia y describe de forma cuantitativa, cuanto tiempo permanecen las moléculas de los

diferentes fluidos en el interior del reactor. Si  $N_o$  se desconoce, se puede obtener por integración de la expresión V.1., ecuación V.5.

$$N_o = \int_0^{\infty} QC(t)dt \dots\dots\dots(V.5)$$

Como Q es constante, sustituyendo la expresión V.5 en V.3 y realizando simplificaciones se llega a la ecuación V.6.

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \dots\dots\dots(V.6)$$

La integral en el denominador es el área bajo la curva C(t).

Una manera alternativa de interpretar la función de distribución del tiempo de residencia es en forma integral, definiendo F(t) ecuación V.7, donde F(t) representa matemáticamente, la fracción de trazador que abandona el reactor después de haber permanecido dentro de éste, un periodo de tiempo comprendido entre  $t_1$  y  $t_2$ .

$$F(t) = \int_{t_1}^{t_2} E(t)dt \dots\dots\dots(V.7)$$

Como se puede determinar la cantidad de material que ha ocupado el reactor durante un tiempo t comprendido entre  $t = 0$  (inicio de la prueba) y hasta  $t = \infty$  (final de la prueba) es 1; por lo que:

$$\int_0^{\infty} E(t)dt = 1 \dots\dots\dots(V.8)$$

Otra metodología para la entrada de trazador en disparo, Aris (1959) citado por Levenspiel (1987), demostró que para esta condición se puede escribir con suficiente exactitud:

$$\Delta\sigma_0^2 = \Delta\sigma_0^2/t_p^2 = 2D/uL \dots\dots\dots(V.9)$$

Cuando la curva de distribución sea ancha y asimétrica, hemos de suponer que la dispersión es demasiado grande, para que pueda emplearse una simplificación, por lo que la variancia de una distribución continua, medida en un número finito de

puntos equidistantes, viene dada por las ecuaciones V.10 y V.11 y re-arreglando obtenemos V.12

$$F = \int_0^t E \delta t = \int_0^t C \delta t \dots\dots\dots(V.10)$$

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t-\bar{t})^2 C \delta t}{\int_0^{\infty} C \delta t} \dots\dots\dots(V.11)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i C_i}{\sum C_i} - \left[ \frac{\sum t_i C_i}{\sum C_i} \right]^2 \dots\dots\dots(V.12)$$

De acuerdo a estas ecuaciones, y considerando que la fracción de material que ha residido en el interior del reactor durante el tiempo t comprendido desde t = 0 hasta t = ∞ (final de la prueba) es 1, por lo que: Se aprovecha la aplicación de la inyección en pulso debido a que un punto de inyección específico que garantiza la no dispersión del trazador

**Pruebas en continuo o de escalón positivo.**

Esta metodología se basa en inyectar una cantidad continua de trazador a la alimentación del sistema desde el tiempo t = 0. Considerando que antes de este tiempo no se había agregado cantidad alguna. Simbólicamente se tiene:

$$\begin{array}{ll} C(t) = 0 & t \leq 0 \\ 0 < C(t) > \text{constante} & 0 < t < \infty \\ C(t) = \text{constante} & t \approx \infty \end{array}$$

Una vez que ha iniciado la adición del trazador al sistema, la concentración con la cual inicio la inyección debe mantenerse hasta que la concentración medida en el efluente sea similar a la de la inyección, con lo que la prueba habrá finalizado.

A un tiempo t dado, el trazador en el efluente ha residido en tiempo “t” en el interior del sistema, esto significa que la cantidad [C(t)/C<sub>0</sub>] es la fracción del trazador que ha permanecido dentro del reactor un tiempo similar al tiempo “t”. Si el trazador se comporta de manera similar al resto del material que se encuentra dentro del sistema (agua), la relación

es además, la fracción del flujo de salida que ha permanecido un periodo de tiempo “t” en el interior del reactor. Matemáticamente se tiene:

$$\left[ \frac{C(t)}{C_o} \right]_{\text{escalón}(+)} = \int_0^{\infty} E(t) dt \dots\dots\dots(V.13)$$

Diferenciando la expresión anterior para obtener la función de distribución del tiempo de residencia, se obtiene:

$$E(t) = \frac{d}{dt} \left[ \frac{C(t)}{C_o} \right]_{\text{escalón}(+)} \dots\dots\dots(V.14)$$

El método de escalón es experimentalmente más sencillo que el método de pulso.

El tiempo de residencia nominal el cual se obtiene con el volumen del reactor y el gasto de alimentación del reactor , se puede decir que no corresponde a la realidad, por lo que la prueba de trazador permite obtener una estimación real del tiempo de residencia promedio efectivo ( $t_m$ ) del reactor.

$$t_m = \int_0^{\infty} tE(t) dt \dots\dots\dots(V.15)$$

La mejor manera de comparar varias distribuciones es mediante el uso de sus momentos. El más empleado es la variancia o cuadrado de la desviación estándar definido de acuerdo a la ecuación V.16

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - t_m)^2 E(t) dt \dots\dots\dots(V.16)$$

La magnitud de este momento es un indicativo de la dispersión de la distribución.

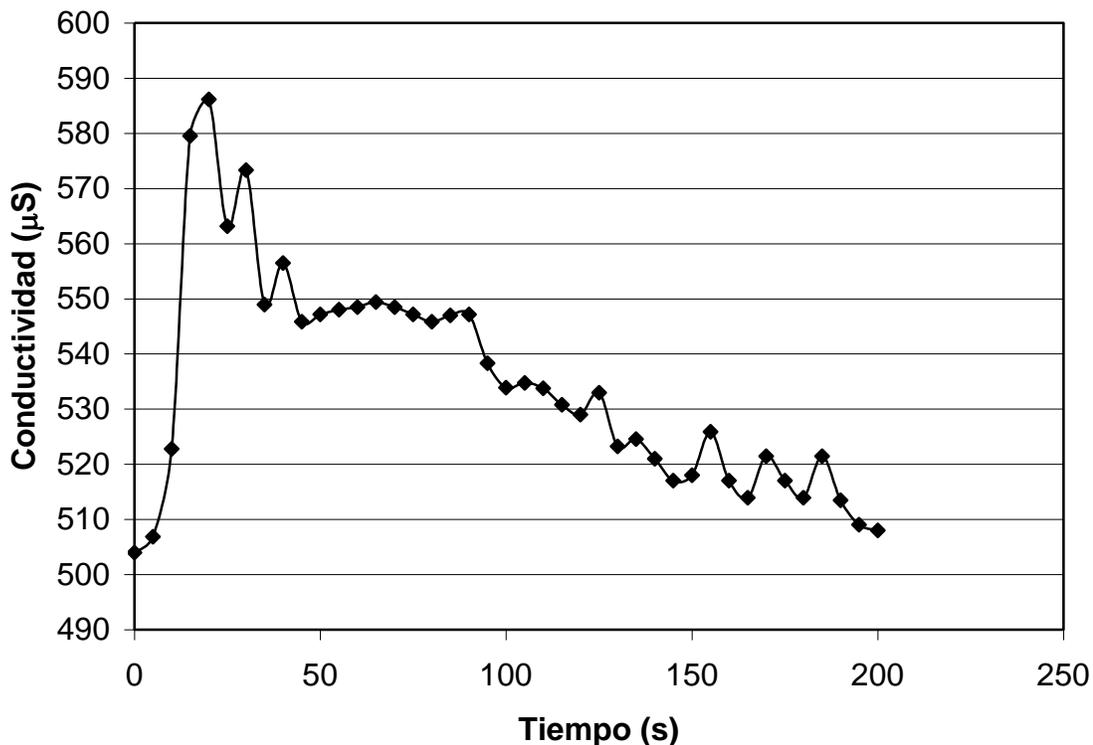
Como ejemplo de la metodología seguida se presentarán la forma en que se trabajaron los datos por cada método, así, para el método de pulso se presentan los resultados de la zona del manto de lodo, midiendo el tiempo de residencia medio al realizar la inyección en la parte superior del sistema salida de la mezcla rápida.

En la tabla V.1 se muestran los resultados obtenidos para esta prueba, obteniendo un tiempo promedio de 75.65 s con una variancia de 2353.8, lo que indica una dispersión del trazador, lo que se muestra también en la figura V.1 con un pico al inicio de la prueba 15-20 s pero una larga cola para terminar la prueba a un tiempo de 200 s

Tabla V.1. Datos de la prueba realizada por inyección de pulso

Tiempo	Conductividad	Conductividad modificada		
ti (s)	Cond Ci ( $\mu$ S)	(Ci -Co) = C(t)	(ti)(C)	(ti) <sup>2</sup> (C)
0	504	0	0	0
5	506.83	2.83	14.15	70.75
10	522.79	18.79	187.9	1879
15	579.52	75.52	1132.8	16992
20	586.17	82.17	1643.4	32868
25	563.12	59.12	1478	36950
30	573.32	69.32	2079.6	62388
35	548.94	44.94	1572.9	55051.5
40	556.47	52.47	2098.8	83952
45	545.84	41.84	1882.8	84726
50	547.16	43.16	2158	107900
55	548	44	2420	133100
60	548.5	44.5	2670	160200
65	549.38	45.38	2949.7	191730.5
70	548.5	44.5	3115	218050
75	547.16	43.16	3237	242775
80	545.84	41.84	3347.2	267776
85	547	43	3655	310675
90	547.16	43.16	3884.4	349596
95	538.3	34.3	3258.5	309557.5
100	533.87	29.87	2987	298700
105	534.75	30.75	3228.75	339018.75
110	533.77	29.77	3274.7	360217
115	530.76	26.76	3077.4	353901
120	529	25	3000	360000
125	532.98	28.98	3622.5	452812.5
130	523.23	19.23	2499.9	324987
135	524.56	20.56	2775.6	374706
140	521.02	17.02	2382.8	333592
145	517.02	13.02	1887.9	273745.5
150	518	14	2100	315000
155	525.89	21.89	3392.95	525907.25
160	517.02	13.02	2083.2	333312
165	513.92	9.92	1636.8	270072
170	521.46	17.46	2968.2	504594
175	517	13	2275	398125
180	513.92	9.92	1785.6	321408
185	521.46	17.46	3230.1	597568.5
190	513.48	9.48	1801.2	342228
195	509.04	5.04	982.8	191646
200	508	4	800	160000
$\Sigma$		1250.15	94577.55	10097777.8

Nota: Los valores negativos no fueron considerados en los cálculos



**Figura V.1 distribución del tiempo de residencia para la sección del inicio del manto de lodo**

$$\begin{aligned}
 t_m &= 75.6529 \\
 \text{Variancia} &= 2353.88 \\
 (D/UL)^2 &= 0.4113
 \end{aligned}$$

Escalón positivo

Para la prueba en escalón positivo, (tabla V.2) una vez obtenidos los datos se divide la conductividad obtenida (restándole la conductividad del agua) entre la conductividad máxima, se realiza un grafico para obtener la expresión matemática que describa el comportamiento del experimento, se aplica sobre ésta una regresión (derivada con respecto al tiempo) y finalmente obtener el valor  $E(t)$  esto se realiza con el apoyo del software matlab (1996) versión estudiantil.

Tabla V.2. Datos de la prueba por escalón positivo.

Tiempo (min)	Conductividad modificada C(t) ( $\mu\text{S}$ )	C(t)/C <sub>máx</sub> (mg/L)	Regresión C(t)/C <sub>max</sub>	E(t) d/dt[C(t)/C <sub>max</sub> ]	t E(t) (s)
0	0	0.0000	0.00E+00	-0.0076	0
1	0	0.0000	-0.00651	-0.00543	-0.00543
2	6	0.0140	-0.01088	-0.00332	-0.00664
3	6	0.0140	-0.01317	-0.00127	-0.00381
4	6	0.0140	-0.01344	0.00072	0.00288
5	6	0.0140	-0.01175	0.00265	0.01325
6	6	0.0140	-0.00816	0.00452	0.02712
7	6	0.0140	-0.00273	0.00633	0.04431
8	6	0.0140	0.00448	0.00808	0.06464
9	6	0.0140	0.01341	0.00977	0.08793
10	12	0.0280	0.024	0.0114	0.114
11	6	0.0140	0.03619	0.01297	0.14267
12	12	0.0280	0.04992	0.01448	0.17376
13	12	0.0280	0.06513	0.01593	0.20709
14	21	0.0490	0.08176	0.01732	0.24248
15	21	0.0490	0.09975	0.01865	0.27975
16	33	0.0769	0.11904	0.01992	0.31872
17	48	0.1119	0.13957	0.02113	0.35921
18	75	0.1748	0.16128	0.02228	0.40104
19	99	0.2308	0.18411	0.02337	0.44403
20	75	0.1748	0.208	0.0244	0.488
21	93	0.2168	0.23289	0.02537	0.53277
22	90	0.2098	0.25872	0.02628	0.57816
23	102	0.2378	0.28543	0.02713	0.62399
24	102	0.2378	0.31296	0.02792	0.67008
25	105	0.2448	0.34125	0.02865	0.71625
26	126	0.2937	0.37024	0.02932	0.76232
27	138	0.3217	0.39987	0.02993	0.80811
28	171	0.3986	0.43008	0.03048	0.85344
29	174	0.4056	0.46081	0.03097	0.89813
30	174	0.4056	0.492	0.0314	0.942
31	198	0.4615	0.52359	0.03177	0.98487
32	207	0.4825	0.55552	0.03208	1.02656
33	234	0.5455	0.58773	0.03233	1.06689
34	264	0.6154	0.62016	0.03252	1.10568
35	270	0.6294	0.65275	0.03265	1.14275
36	288	0.6713	0.68544	0.03272	1.17792
37	282	0.6573	0.71817	0.03273	1.21101
38	297	0.6923	0.75088	0.03268	1.24184
39	306	0.7133	0.78351	0.03257	1.27023
40	324	0.7552	0.816	0.0324	1.296

41	348	0.8112	0.84829	0.03217	1.31897
42	324	0.7552	0.88032	0.03188	1.33896
43	324	0.7552	0.91203	0.03153	1.35579
44	324	0.7552	0.94336	0.03112	1.36928
45	315	0.7343	0.97425	0.03065	1.37925
46	336	0.7832	1.00464	0.03012	1.38552
47	327	0.7622	1.03447	0.02953	1.38791
48	339	0.7902	1.06368	0.02888	1.38624
49	336	0.7832	1.09221	0.02817	1.38033
50	351	0.8182	1.12	0.0274	1.37
51	369	0.8601	1.14699	0.02657	1.35507
52	393	0.9161	1.17312	0.02568	1.33536
53	384	0.8951	1.19833	0.02473	1.31069
54	420	0.9790	1.22256	0.02372	1.28088
55	396	0.9231	1.24575	0.02265	1.24575
56	402	0.9371	1.26784	0.02152	1.20512
57	423	0.9860	1.28877	0.02033	1.15881
58	429	1.0000	1.30848	0.01908	1.10664
59	414	0.9650	1.32691	0.01777	1.04843
60	423	0.9860	1.344	0.0164	0.984

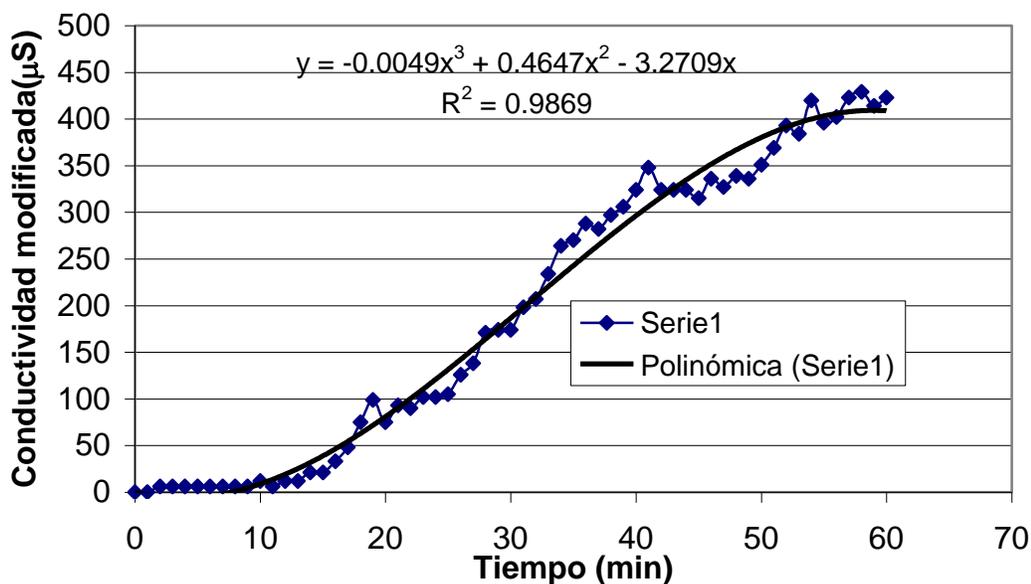
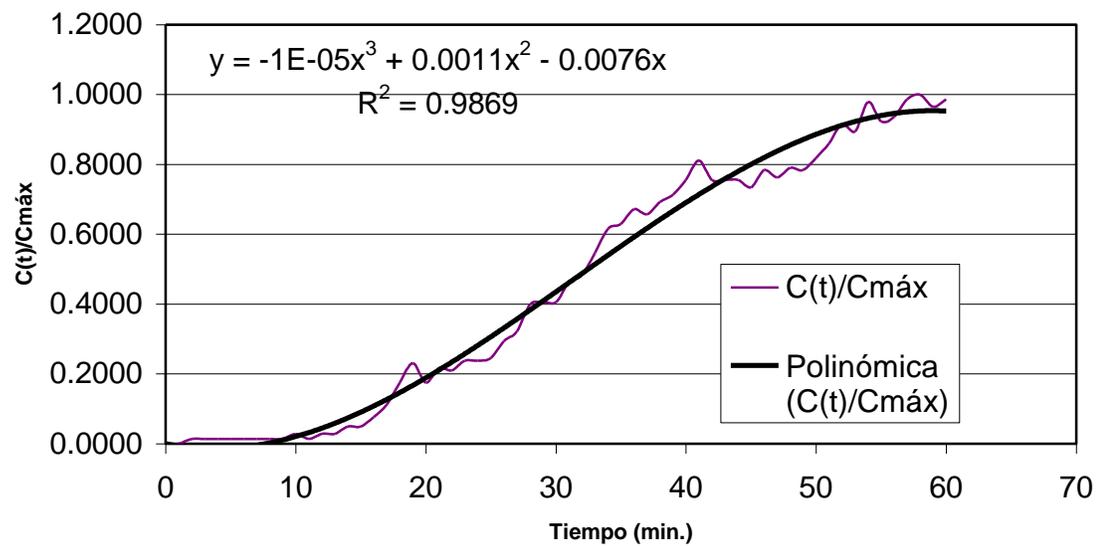


Figura V.3. Conductividad con respecto al tiempo para inyección por escalón positivo

## Regresión



**Figura V.4. Regresión  $C(t)/C_{max}$  para proceder a la derivación de la expresión**

El tiempo promedio para la etapa de clarificación fue de 47.515 min (2851 s)