

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL GRADIENTE DE MEZCLA EN
UNA PLANTA DE POTABILIZACIÓN CONSIDERANDO LA DOSIS
MEJORADA, EL RÉGIMEN HIDRÁULICO Y LA CALIDAD DEL AGUA**

Realizado por:

Karen Inmar Reyes López

Trabajo de grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito
parcial para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO

Puerto La Cruz, junio de 2011

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL GRADIENTE DE MEZCLA EN
UNA PLANTA DE POTABILIZACIÓN CONSIDERANDO LA DOSIS
MEJORADA, EL RÉGIMEN HIDRÁULICO Y LA CALIDAD DEL AGUA**

ASESORES

Ing. Quím. Milena Amundaraín, M.Sc

Asesor Académico

Ing. Mec. Walmore Piñango

Asesor Industrial

Puerto La Cruz, junio de 2011

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL GRADIENTE DE MEZCLA EN
UNA PLANTA DE POTABILIZACIÓN CONSIDERANDO LA DOSIS
MEJORADA, EL RÉGIMEN HIDRÁULICO Y LA CALIDAD DEL AGUA**

JURADO

Ing. Milena Amundaraín, M.Sc

Asesor Académico

Ing. Quím. Petra Martínez, M.Sc

Jurado Principal

Ing. Quím. Alexis Cova, M.Sc

Jurado Principal

Puerto La Cruz, junio de 2011

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 41 del Reglamento de Trabajos de Grado:

Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente, y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien deberá participarlo previamente al Consejo Universitario, para su autorización.

DEDICATORIA

A Dios por impulsarme a creer en mí misma y a demostrar con hechos de lo que soy capaz de lograr.

A mis pequeños angelitos Francisca López Cedeño y José Reyes por ser mis grandes protectores y guías en este largo camino.

A mis padres Carlina López y Eedito Reyes por ser el más grande ejemplo de que la constancia y perseverancia conlleva a la superación y al ÉXITO.

AGRADECIMIENTOS

Lo maravilloso de esta gran experiencia fue encontrar personas a las que nunca espere encontrar, personas que me brindaron ayuda sin importar de donde venia ni quien era en realidad. Familias pequeñas con corazones gigantes que me hicieron apreciar nuevas tierras y considerarlas mi segundo hogar; a estas personas más que un simple GRACIAS les deseo un millón de bendiciones.

Mi primer agradecimiento va hacia Dios por permitirme vivir en este mundo lleno de buenas y malas experiencias que me hicieron crecer, madurar y aprender que la vida sin obstáculos es una historia sin grandes triunfos.

A mi madre Carlina López por su apoyo incondicional y por enseñarme que en la vida nada es fácil y lo imposible no existe ya que los ideales están hechos para impulsarnos hacia el ÉXITO. Por exigirme cada día más para lograr mis metas con principios, valores y responsabilidad. Dios bendiga el día que logre alcanzar tus pasos y ser vista como un modelo a seguir como tú lo fuiste para mí.

A mi padre Edito Reyes por su gran apoyo y por demostrarme que en la vida no existen perfectos sino grandes luchadores que creen en sus sueños. Como agradecer que me veas como un orgullo, cuando más agradecida estoy yo con Dios y la vida de que seas mi taita.

A mi hermano José Alejandro Reyes por regalarme su cariño y siempre alentarme a no dejar de cumplir mi más preciada meta. Dios te bendiga hermanito y gracias por enseñarme a saber cuándo demostrar cuanto uno vale en realidad.

A mi Familia Reyes y Familia López por siempre estar allí al pendiente de mi futuro, gracias por todo su apoyo.

A mi angelito Miguelangel García, por ser mi mejor amigo, confidente y acompañante en cada logro y fracaso. Gracias por enseñarme que de nada vale

luchar en la vida para tener triunfos en el futuro si no disfrutamos y vivimos cada tropiezo y ganancia del presente. Entenderme y calmarme en aquellos días donde todo se veía imposible de lograr ha sido el mejor regalo que me pudiste dar. Dios te bendiga por siempre. Te amo.

A “EL TERCIO” (María Estefanía González y Yasither Muñoz) por ser las primeras personitas que me demostraron que la verdadera amistad si existe, gracias por siempre estar allí como mi única familia en este nuevo hogar. Las quiero mucho fritas, Dios las bendiga siempre.

A mis mejores amigos de estudio: Dayana Zamora (Hermana) por ser mi mano derecha y estar allí en las buenas y malas para ayudarme y tratarme como la hermana que nunca tuve; María Cecilia Granadino (Tipa/Wey) por ser la primera personita valiosa que conocí en la UDO y me trato como si fuera de su familia; Jesús Díaz (Viejo) por el apoyo y la fortaleza que me brindaste en tan poco tiempo y por ser el hermano mayor que nunca tuve; que dios los bendiga a todos, los quiero mucho.

Gracias a la Familia González Bernay (Familia Vitó), Familia Granadino y Familia García Moreno por recibirme en sus hogares como una hija más, gracias por confiar en mí y brindarme tanta ayuda. Siempre los considerare como mi segunda familia.

Gracias a todo el personal de la planta La Guairita (HIDROCAPITAL) en especial a Walmore Piñango, Ingrid Rojas, Marilys Vivas y Sr. Porras por toda la ayuda y conocimiento que me brindaron a lo largo de este proyecto.

A la profesora Milena Amundarain por valorar y contribuir de manera importante en el desarrollo de esta investigación.

A todo el personal administrativo y profesores de la Universidad de Oriente por que no solo me formaron como profesional sino también como una persona integral.

*Gracias a Todos.
Karen I. Reyes L.*

RESUMEN

Uno de los factores más importantes para el desarrollo sustentable, es el abastecimiento continuo y seguro de agua potable hacia la población; este abastecimiento involucra una serie de obras y actividades integradas en un sistema, donde cada una de sus partes está interconectada entre sí, teniendo en cuenta que cualquier tipo de perturbación que llegase a interferir con una de ellas, afectaría el desempeño del proceso. Por esto en esta investigación se busca una solución a los problemas operacionales más importantes que acarrea la principal planta de potabilización de la ciudad de Caracas, la planta La Guairita. El primer paso para ello, fue la obtención de los tiempos de retención y los gradientes hidráulicos con que opera la misma en sus diferentes etapas (coagulación, floculación y sedimentación) con el fin de ajustar los ensayos de laboratorio y así poder simular las condiciones reales de planta. En cada ensayo se pudo observar, que con un tiempo de sedimentación de 30 minutos, es suficiente para que el tratamiento ideal se asemeje al real, sin importar la calidad o caudal del agua de alimentación. Al tratar diferentes mezclas de fuentes (embalses y ríos) se presentan diversas situaciones en el tratamiento de potabilización; pero se pudo observar que con la aplicación de una dosis de 60 a 70 ppm de sulfato de aluminio en estado líquido como coagulante para medianas y altas turbiedades y de 40 ppm para bajas turbiedades, se puede tratar el agua de la planta sin importar el caudal, ni la situación actual a nivel de operación y mantenimiento. Se pudo demostrar, que la floculación puede ser más efectiva y se puede generar una disminución en el consumo de coagulante en el proceso, si se adiciona un gradiente mecánico de 4 s^{-1} a escala de laboratorio y planta, sin importar el caudal o calidad del agua; comprobándose que el tratamiento tiene un eficaz desempeño hasta un punto medio de la zona de sedimentación. En este proyecto se recomiendan diferentes mejoras a nivel de equipos y diseño de unidades que pudiesen ayudar a mejorar el desenvolvimiento de la planta, como: la instalación de impulsores rotatorios tipo hélice en la tanquilla de mezcla, repara o sustituir motorreductores en el área de floculación y cambiar sistemas de recolección de lodos en los sedimentadores.

CONTENIDO

	Pág.
ASESORES	i
RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
RESUMEN	viii
CONTENIDO.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xv
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA HIDROCAPITAL	1
• Objetivo de la empresa.....	2
• Visión de la empresa	3
• Misión de la empresa.....	3
1.2 Ubicación geográfica de la empresa	3
a. Ubicación geográfica de las fuentes.....	4
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
1.4 OBJETIVOS	7
1.5.1 Objetivo General.....	7
1.5.2 Objetivos Específicos	7
CAPÍTULO II.....	9
2.1 Antecedentes	9
2.2 Generalidades del agua	11
2.2.1 Parámetros físicos y químicos más importantes en la calidad del agua	

2.2.2	Componentes de un sistema de abastecimiento de agua potable	16
2.2.3	Clasificación de las plantas de tratamiento para potabilización de aguas en función de los arreglos existentes en Venezuela	19
2.2.4	Descripción del proceso de potabilización de la planta de tratamiento La Guairita	21
2.3	Principales tratamientos y equipos utilizados en sistemas de potabilización en plantas de tipo convencional	22
2.3.1	Oxido-Desinfección	22
2.3.2	Coagulación	23
2.3.3	Floculación	26
2.3.4	Sedimentación	29
2.3.5	Filtración	31
2.4	Factores que afectan el proceso de coagulación y floculación.....	32
2.4.1	pH.....	32
2.4.2	Alcalinidad	33
2.4.3	Temperatura.....	33
2.4.4	Turbiedad	33
2.4.5	Concentración de coagulantes	34
2.4.6	Tiempo de retención.....	36
2.4.7	Gradientes de velocidad.....	36
2.5	PRUEBA DE JARRAS	38
2.5.1	Tiempo de sedimentación	40
2.6	Factores que afectan el proceso de sedimentación	40
CAPITULO III.....		43
DESARROLLO DEL PROYECTO		43

3.1	Cálculo de gradientes de mezcla y tiempos de retención en las diferentes unidades del proceso.....	43
3.1.1	Sistema de potabilización del agua en la planta La Guairita	44
3.1.2	Gradiente de mezcla hidráulico y tiempo de retención en sistema de tuberías.....	46
3.1.3	Gradiente de mezcla y tiempo de retención en tanquilla de mezcla o coagulador	52
3.1.4	Gradiente de mezcla hidráulico y tiempo de retención en floculador.	59
3.1.5	Tiempo de retención en el sedimentador	67
3.2	Determinación del tiempo de sedimentación experimental	70
3.2.1	Diferencias entre el tiempo de retención en sedimentadores y tiempo de sedimentación.....	70
3.2.2	Cálculo de gradientes de mezcla mecánicos en floculación.....	71
3.2.3	Definición del mejor tiempo de sedimentación en las pruebas de jarras	79
3.3	Cálculo de la dosis mejorada a través de pruebas de jarras	81
3.3.1	Simulación de proceso de potabilización a escala de laboratorio	81
3.4	Influencia de la variación del gradiente mecánico	84
3.4.1	Variación del gradiente mecánico en planta.....	84
3.4.2	Importancia del punto de captación de muestra en sedimentador ...	85
3.4.3	Variación del gradiente de mecánico en laboratorio.....	87
3.5	Propuesta de mejoras en el proceso de potabilización de la planta la guairita.....	88
3.5.1	Evaluación del proceso de potabilización.....	88
3.6	Equipos, materiales, sustancias y herramientas	92
3.6.1	Equipos	92

3.6.2	Sustancias	92
3.6.3	Herramientas	92
CAPÍTULO IV	93
DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y	93
RECOMENDACIONES	93
4.1	Gradientes de mezcla hidráulicos y tiempos de retención en cada etapa del proceso de potabilización	93
4.1.1	Tiempos de retención	93
4.1.2	Gradiente de mezcla hidráulico	100
4.2	Tiempo de sedimentación experimental	105
4.2.1	Ajuste de gradiente mecánico de mezcla en floculación	105
4.2.2	Determinación de tiempo de sedimentación en prueba de jarra	108
4.3	CÁLCULO DE LA DOSIS MEJORADA DE COAGULANTE.....	115
4.3.1	Determinación de la dosis mejorada en prueba de jarra	116
4.4	Influencia del gradiente mecánico en el proceso de floculación.....	119
4.4.1	Efectos del gradiente mecánico a nivel de planta.....	119
4.4.2	Efectos del gradiente mecánico a nivel de laboratorio	123
4.5	Mejoras para el proceso de potabilización a nivel operacional y mantenimiento	125
4.5.1	Posibles consecuencias del deficiente desempeño del proceso de potabilización	125
4.5.2	Posibles soluciones para el proceso de potabilización.....	126
4.6	CONCLUSIONES.....	135
4.7	RECOMENDACIONES	136
BIBLIOGRAFIA	138

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:..... 141

LISTA DE TABLAS

Pág.	
	Tabla 2. 2 Clasificación de filtros profundos (Najul, 2007)..... 32
	Tabla 2. 3 Clasificación de sedimentadores en función de la calidad de agua producida (Najul, 2007)..... 41
	Tabla 2. 4 Interferencias en el proceso de sedimentación (Arboleda, 1992) 42
	Tabla 3. 1 Periodos de tiempo y velocidades angulares de las paletas del floculador..... 72
	Tabla 3. 2 Valores de coeficiente de arrastre (C_D) en secciones rectangulares (Arboleda, 1992) 77
	Tabla 3. 3 Equivalencias de gradientes mecánicos en segundos para ajuste de motorreductores 85
	Tabla 4. 1 Número de líneas y caudal de alimentación que opera la planta La Guairita..... 94
	Tabla 4.2 Tiempos de retención en el sistema de tuberías a diferentes caudales de alimentación manejados por la planta 95
	Tabla 4.3 Tiempos de retención en la coagulador a diferentes caudales de alimentación manejados por la planta 96
	Tabla 4.4 Tiempos de retención en floculador a diferentes caudales de alimentación con cinco (5) unidades de floculación operando 99
	Tabla 4.5 Tiempos de retención en sedimentador a diferentes caudales de alimentación con cinco (5) unidades de sedimentación operando 100
	Tabla 4.6 Gradiente de mezcla en el sistema de tubería a diferentes caudales de alimentación manejados por la planta 102
	Tabla 4.7 Gradiente de mezcla en el coagulador a diferentes caudales de alimentación manejados por la planta 103
	Tabla 4.8 Gradiente de mezcla en floculador hidráulico a diferentes caudales de alimentación con cinco (5) unidades de floculación operando 105

Tabla 4. 9 Ajuste de gradientes mecánicos e hidráulicos para cada caudal de alimentación con cinco (5) floculadores en operación.....	107
Tabla 4. 10 Gradientes y tiempos de retención ajustados en prueba de jarra para la determinación del tiempo de sedimentación.....	107
Tabla 4. 11 Resultados de aluminio residual en cada prueba de jarra para la determinación del tiempo de sedimentación experimental.....	115
Tabla 4. 12 Gradientes y tiempos de retención ajustados en prueba de jarra para la determinación de la dosis mejorada	116
Tabla 4. 13 Variación del porcentaje de remoción de color y turbiedad de acuerdo al gradiente mecánico ajustado en la floculación	124
(Ensayo N° 2).....	124
Tabla 4. 14 Variación de la carga superficial con cinco (5) sedimentadores operando.....	131
Tabla 4. 15 Variación de la carga superficial con seis (6) sedimentadores operando.....	132
Tabla 4. 16 Variación de la velocidad horizontal con cinco sedimentadores operando.....	133
Tabla 4. 17 Variación de la velocidad horizontal con cinco sedimentadores operando.....	133

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1 Sistema de distribución y mezcla de embalses utilizados por Hidrocapital (MECOFLU, C.A, 1996).	1
Figura 1. 2 Ubicación de la Planta La Guairita en el Sistema Metropolitano (MECOFLU, C.A, 1996).	3
Figura 1. 3 Ubicación geográfica de Planta La Guairita (HIDROCAPITAL, 1991).	4
Figura 2. 1 Diagrama general del proceso de potabilización en la planta La Guairita (Ingeniería Briper, C.A, 2001).	22
Figura 2. 2 Modelo esquemático del proceso de coagulación (Vargas, 2004).	23
Figura 2. 3 Configuración esquemática de la Doble Capa eléctrica (Vargas, 2004).	26
Figura 2. 4 Representación esquemática del modelo de puente químico (Vargas, 2004).	27
Figura 2. 5 Esquema de la zonificación de un sedimentador rectangular (Rojas, 2000).	30
Figura 2. 6 Relación dosis de coagulante vs. concentración de coloides (Najul, 2007).	34
Figura 2. 7 Remoción de turbiedad en función de la dosis de coagulante aplicada (Najul, 2007).	35
Figura 2. 8 Interacción entre la fuerzas de corte por acción de la velocidad y las fuerzas de presión (Arboleda, 1992).	37
Figura 2. 9 Equipo de prueba de jarras Phipps & Bird.	39
Figura 3.1 Esquema de las etapas estudiadas en el sistema de potabilización de la planta La Guairita (Ingeniería Briper, C.A, 2001).	45
Figura 3. 2 Coeficiente de pérdida (K) para expansión brusca (Bolinaga, 1992).	50
Figura 3. 3 Esquema del sistema de mezcla rápida.	53
Figura 3. 4 Corte transversal de vertedero (Bolinaga, 1992).	54
Figura 3. 5 Longitud total del recorrido del fluido en el coagulador.	56
Figura 3. 6 Ubicación de pantallas en floculadores de la planta La Guairita.	60
Figura 3. 7 Longitud total del recorrido del fluido en el floculador.	63

Figura 3. 8 Desviación del fluido de acuerdo a los tabiques en el floculador.	64
Figura 3. 9 Corte transversal del sedimentador.	68
Figura 3. 10 Sistema de paletas de floculador mecánico.	74
Figura 3. 11 Ubicación de pares de paletas en el eje.	76
Figura 3. 12 Ábaco que relaciona el gradiente de velocidad con las revoluciones por minuto de un equipo de prueba de jarras con recipientes de 2 litros de sección cuadrada (Vargas, 2004).	80
Figura 3. 13 Puntos de captación de muestra en el sedimentador.	86
Figura 3. 14 Ubicación del corte del tratamiento en sedimentador.	87
Figura 3. 15 Comportamiento de partículas de diferentes velocidades en sedimentador (Arboleda, 1992).	89
Figura 4.1 Variación del tiempo de retención en el sistema de tuberías a diferentes caudales de alimentación.	95
Figura 4.2 Variación del tiempo de retención en coagulador a diferentes caudales de alimentación.	97
Figura 4.3 Variación del tiempo de retención en el floculador a diferentes caudales de alimentación con cinco (5) floculadores operando.	98
Figura 4. 4 Variación del tiempo de retención en el sedimentador a diferentes caudales de alimentación con cinco (5) sedimentadores operando.	98
Figura 4. 5 Variación del gradiente de mezcla en el sistema de tuberías a diferentes caudales de alimentación.	101
Figura 4. 6 Variación del gradiente de mezcla en el coagulador a diferentes caudales de alimentación.	102
Figura 4. 7 Variación del gradiente de mezcla en el floculador hidráulico a diferentes caudales con cinco (5) unidades de floculación operando.	104
Figura 4. 8 Variación de la turbiedad en cada prueba de jarra con respecto al tiempo de sedimentación (Parte II).	109
Figura 4. 9 Variación del color en cada prueba de jarra con respecto al tiempo de sedimentación (Parte II).	111
Figura 4. 10 Variación de sólidos sedimentables en cada prueba de jarra con respecto al tiempo de sedimentación (Parte II).	113

Figura 4. 11 Variación del porcentaje de remoción de turbiedad y color en la dosificación de coagulante de la prueba N° 19 (baja turbiedad).	117
Figura 4. 12 Variación del porcentaje de remoción de turbiedad y color en la dosificación de coagulante de la prueba N° 21 (mediana-alta turbiedad).	118
Figura 4. 13 Variación del porcentaje de remoción de color y turbiedad según el punto de captación de muestra en los sedimentadores para	121
$G = 2 \text{ s}^{-1}$ (Prueba N° 3)	121
Figura 4. 14 Variación del porcentaje de remoción de color y turbiedad según el punto de captación de muestra en los sedimentadores para	121
$G = 4 \text{ s}^{-1}$ (Prueba N° 1)	121
Figura 4. 15 Variación del porcentaje de remoción de color y turbiedad según el punto de captación de muestra en los sedimentadores para	122
$G = 6 \text{ s}^{-1}$ (Prueba N° 1)	122
Figura 4. 16 Porcentaje de remoción de color y turbiedad de acuerdo al gradiente mecánico ajustado en la floculación para 90 ppm de coagulante (Ensayo N° 2)	125

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA HIDROCAPITAL

La empresa operadora de acueductos del Distrito Capital, Miranda y Vargas (Hidrocapital) está adscrita al Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, bajo los lineamientos de Hidroven, casa matriz del sector agua potable y saneamiento. Desde su fundación el 11 de abril de 1991, atiende los 24 municipios del Distrito Capital y de los estados Miranda y Vargas

En Hidrocapital, cuentan con doce plantas de tratamiento para agua potable, entre las que destacan Caujarito, La Mariposa y La Guairita, por ser las de mayor producción y una de pre-tratamiento que acondiciona el agua del río Tuy (Figura 1.1). Estas plantas son de tratamiento convencional, es decir, realizan los procesos de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección; gracias a ellas, esta empresa garantiza agua potable a los habitantes de la región capital y los estados: Miranda y Vargas.

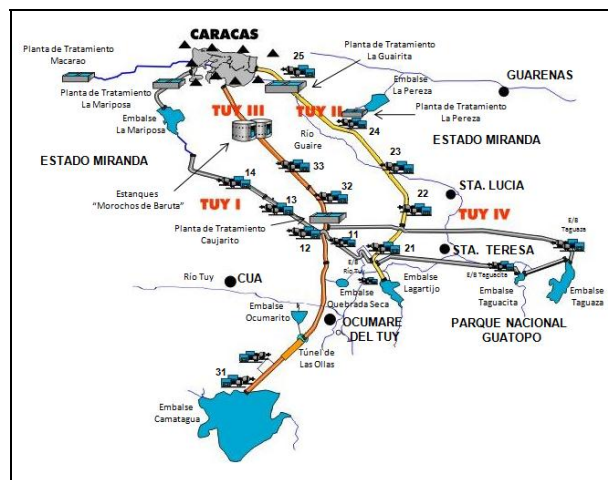


Figura 1. 1 Sistema de distribución y mezcla de embalses utilizados por Hidrocapital (MECOFLU, C.A, 1996).



La planta de tratamiento Ciudad de Caracas, mejor conocida como La Guairita, opera desde 1967; está ubicada al final de la Av. Principal de Macaracuay en la región capital y su capacidad máxima de producción es de 7500 litros por segundo, abasteciendo un 25 % de las comunidades de la gran Caracas. Utiliza como fuente de abastecimiento: los embalses Lagartijo, Taguaza, Quebrada Seca, La Pereza, y el río Tuy. Con una producción promedio mensual de 17.071.392 m³, para el consumo de aproximadamente 969.870 habitantes del sistema Metropolitano de la Gran Caracas.

Dependiendo de los requerimientos de producción y de los niveles de ríos y embalses, se efectúa la mezcla de las fuentes de abastecimiento en la estación 21 ubicada en el Tuy (Figura 1.1). Luego el agua es conducida por medio de una tubería de 1,8 metros de diámetro a una distancia de 80 km y a una altura de 900 metros hasta la estación de bombeo N° 24; para vencer esta carga se encuentran de forma intermedia las estaciones de bombeo 22 y 23 del sistema Tuy II.

Finalmente, a partir de la estación N° 24 y con la posibilidad de realizar la mezcla de las fuentes provenientes del Tuy con el embalse la Pereza, que se encuentran conectado a la estación; se realiza el bombeo hasta la planta La Guairita. Esta planta forma parte del sistema Tuy II y fue diseñada para un caudal normal de diseño de 7500 litros por segundo y un caudal máximo de 8000 litros por segundo utilizando para el tratamiento los procesos de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

- **Objetivo de la empresa**

Administrar, operar, mantener, ampliar y rehabilitar los sistemas de distribución de agua potable, de recolección y disposición de aguas servidas, a través de sus sistemas operativos: Metropolitano, Litoral Central, Ciudad Fajardo, Panamericano, Losada-Ocumarito y Barlovento (Figura 1.2).



Figura 1. 2 Ubicación de la Planta La Guairita en el Sistema Metropolitano (MECOFLU, C.A, 1996).

- **Visión de la empresa**

Hidrocapital será una empresa pública exitosa, de ámbito municipal, financieramente sustentable, con una imagen reconocida nacional e internacionalmente por sus innovaciones tecnológicas, talento humano y una positiva incidencia en los clientes, a partir de los estándares logrados en los servicios que presta.

- **Misión de la empresa**

Es una empresa de servicio público, comprometida en prestar a sus clientes un servicio de alta calidad en agua potable y saneamiento, mediante un modelo de gestión sustentable.

1.2 Ubicación geográfica de la empresa

La planta de tratamiento Ciudad de Caracas, mejor conocida como La Guairita; está ubicada al final de la Av. Principal de Macaracuay en la región Capital (Figura 1.3).

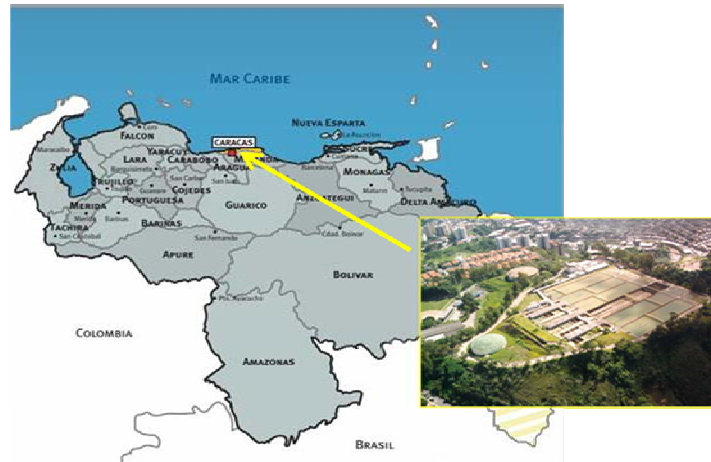


Figura 1. 3 Ubicación geográfica de Planta La Guairita (HIDROCAPITAL, 1991).

a. Ubicación geográfica de las fuentes

Los mayores aportes de agua al acueducto metropolitano provienen de las cuencas de los ríos Guárico, Tuy, y Taguaza, cuyos caudales son aprovechados durante todo el año, gracias a los embalses Lagartijo, Camatagua y Taguaza. Además cuentan con embalses compensatorios como La Mariposa, La Pereza, Ocumarito, Quebrada Seca y Taguacita. Los ríos y embalses utilizados por la planta La Guairita son:

- **Río Tuy**

El río Tuy es el principal río del Estado Miranda; tiene una longitud de 293 kilómetros. Nace cerca del Pico Codazzi en el estado Aragua y discurre en sentido norte-sur hasta la población de El Consejo. De allí continúa hacia el Este atravesando todo el estado Miranda. Sus principales afluentes son: río Guaire, y el río Caucagua, también llamado río Grande. Este desemboca en el Mar Caribe.



- **Embalse Lagartijo**

El embalse Lagartijo se encuentra sobre el río Lagartijo, a cuatro kilómetros de San Francisco de Yare, en el estado Miranda. Fue construido entre 1960 y 1962, con el fin de abastecer de agua a la ciudad de Caracas. También surte a las poblaciones de San Francisco de Yare y Santa Teresa del Tuy. El embalse Lagartijo tiene capacidad para almacenar alrededor de 80 millones de metros cúbicos de agua, en una superficie total de 451 hectáreas.

- **Embalse Taguaza**

El embalse Taguaza está ubicado sobre el río Taguaza, en el Parque Nacional Guatopo, cerca de la población de Aragüita, municipio Acevedo del estado Miranda. Comenzó a construirse en 1986 y fue puesto en funcionamiento en 1997. Tiene una capacidad para almacenar 184 millones de metros cúbicos de agua y una superficie inundada de 649 hectáreas.

- **Embalse La Pereza**

El embalse La Pereza se encuentra a 18 kilómetros de Petare, estado Miranda. Esta represa fue construida en los años 1966 y 1969 por Eneca S.A, para funcionar como embalse compensador de agua para la ciudad de Caracas, en caso de falla del Sistema Tuy II. La Pereza cuenta con una capacidad máxima de ocho millones de metros cúbicos.

- **Embalse Quebrada Seca**

El embalse Quebrada Seca está situado entre Santa Teresa del Tuy y Yare, en el estado Miranda. Fue creado entre 1960 y 1961 por la empresa Veletrini Bergamin. Quebrada Seca forma parte del Sistema Tuy Medio y aporta agua a la ciudad capital. La capacidad a nivel normal de este embalse



es de siete millones de metros cúbicos, y cuenta con una superficie total de 95 hectáreas.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Guairita es una de las pocas plantas pertenecientes a Hidrocapital que trabaja con diversidad de fuentes y caudales diariamente. La eficiencia de sus tratamientos no sólo viene dada por la dosis de coagulante que a su vez depende de la calidad del agua, sino también de los gradientes de mezclado en los procesos de coagulación y floculación que están directamente relacionados a los caudales de alimentación. En vista de lo indicado anteriormente, la empresa se plantea por segunda vez realizar esta investigación.

En la primera oportunidad ingenieros de Hidroven desarrollaron un proyecto para mejorar la planta de tratamiento La Guairita, donde el mismo tuvo como objetivo principal corregir las etapas del tratamiento de acuerdo a la diversidad de fuentes utilizadas y a la parte hidráulica y mecánica de la misma; presentando la ingeniería conceptual y básica con sus respectivos costos para la realización de las mejoras y acondicionamiento de la planta.

En esta ocasión la empresa busca evaluar los gradientes de mezcla en la planta La Guairita, considerando la dosis mejorada, el régimen hidráulico y la calidad del agua cruda que alimenta a la misma. En esta oportunidad se comenzará por realizar una evaluación general de la planta, serán calculados los gradientes de mezcla y tiempos de retención en las diferentes unidades del sistema de potabilización, para diferentes caudales de alimentación y posteriormente se obtendrá el tiempo de sedimentación en prueba de jarras, para luego establecer la dosis mejorada de coagulante con el ajuste apropiado del gradiente mecánico, en las paletas presentes en la etapa de floculación a escala de planta y laboratorio.



Finalmente serán propuestas algunas mejoras para las unidades de coagulación, floculación y sedimentación del proceso de potabilización de la planta La Guairita; con el propósito de obtener con este proyecto, soluciones efectivas para las diferentes unidades del sistema, garantizando así la eficiencia del proceso y un agua de calidad para la comunidad.

1.4 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

Evaluar la influencia del gradiente de mezcla en la planta de potabilización Ciudad de Caracas La Guairita (Hidrocapital), considerando la dosis mejorada, el régimen hidráulico y la calidad del agua.

1.5.2 Objetivos Específicos

1. Calcular el gradiente de mezcla y tiempo de retención en las etapas de coagulación, floculación y sedimentación a los diferentes caudales de alimentación.
2. Obtener el tiempo de sedimentación experimental mediante pruebas de jarras a los diferentes caudales y calidades de agua de alimentación.
3. Establecer la dosis mejorada de coagulante mediante pruebas de jarras, ajustando los gradientes mecánicos e hidráulicos de mezcla y tiempos de retención calculados.
4. Estudiar la influencia de la variación del gradiente mecánico en la eficiencia del proceso de floculación y el impacto de este en la calidad del agua sedimentada tanto a escala de laboratorio como en planta.



5. Proponer las mejoras necesarias para la planta potabilizadora, a fin de que se garantice la calidad del agua potable.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Sánchez (2009), realizó una evaluación del reúso del agua de las descargas de lodos provenientes de los clarificadores de la planta potabilizadora de Santa Clara (Clarines). Dicho proyecto ayudó a determinar mediante el ensayo de jarras, que los lodos pueden usarse como ayudante al proceso de floculación y que no es necesario adicionarle productos químicos a las descargas, ya que al ser llevada al sedimentador se logra separar del agua los sólidos, sin dificultad.

Pino (2003), realizó la evaluación de la dosificación de coagulantes y su influencia en las operaciones de coagulación y filtración en plantas de potabilización; obteniéndose que al evaluarse la calidad física y química de los coagulantes, sulfato de aluminio, sinertron y hessidrex, estos se encuentran dentro de las normas de calidad establecidas.

Peña (2001), realizó una evaluación técnica y económica del uso de coagulantes primarios y ayudantes de floculación para la potabilización del agua en la planta de tratamiento Ciudad Caracas, La Guairita. Dicho proyecto ayudó a determinar que el funcionamiento de las unidades de sedimentación depende directamente de la operación de las unidades coagulación-floculación, es decir que mientras más efectiva sea la dosificación de coagulante primario en la mezcla rápida mejor será el resultado del tratamiento de potabilización en la planta.

Mecoflu (1996), Ingenieros de Hidroven desarrollaron un proyecto para mejorar la planta de tratamiento La Guairita en la ciudad de Caracas. El proyecto tuvo como objetivo principal corregir las etapas del tratamiento



(coagulación, floculación, sedimentación y filtración) para certificar la calidad del agua deseada para la diversidad de fuentes que surte a la planta y la parte hidráulica y mecánica de la misma, presentando la ingeniería conceptual y básica con sus respectivos estimados de costo para la realización de las obras de mejoras y acondicionamiento en la planta de tratamiento La Guairita.

En este proyecto son calculados los gradientes de mezcla y tiempos de retención en las etapas de coagulación, floculación y sedimentación para cada caudal de alimentación que utiliza la planta de tratamiento La Guairita; con el propósito de ser ajustados en la misma y ayudando de esta manera que la dosis de coagulante a aplicar actúe de forma eficiente, mejorando la calidad del agua final del proceso.

Primero se obtuvo el tiempo de sedimentación necesario para simular pruebas de jarra que son modificadas de acuerdo a los requerimientos exigidos por el caudal de entrada; captando muestras a distintos tiempos de sedimentación que luego de ser evaluados sus parámetros de calidad algunos presentaran valores similares a los obtenidos en esta etapa en planta, indicando así el tiempo a emplear.

Otro objetivo fundamental es determinar la mejor dosis de coagulante que debe cambiar de acuerdo a la calidad del agua cruda que alimenta a la planta, ya que la misma se caracteriza por trabajar con diferentes fuentes que generan variaciones de los parámetros de calidad diariamente; y en paralelo se define el gradiente de mezcla más adecuado en la floculación mecánica que asegure un buen tratamiento de potabilización.

Por otro lado se proponen mejoras hacia la planta La Guairita para certificar la calidad del agua deseada al final del proceso. A diferencias de otros trabajos realizados sobre la materia, la planta trabajará de forma



análoga a la simulación en pruebas de jarras ajustándose las mismas variables y comparando los resultados de ambos procesos.

2.2 Generalidades del agua

El agua es un componente de la naturaleza que ha estado presente en la Tierra desde hace más de 3.000 millones de años, ocupando tres cuartas partes de la superficie del planeta. Su naturaleza se compone de tres átomos, dos de oxígeno que unidos entre sí forman una molécula de agua, H_2O , la unidad mínima en que ésta se puede encontrar. La forma en que estas moléculas se unen entre sí determinará la forma en que encontramos el agua en nuestro entorno; como líquidos, en lluvias, ríos, océanos, etc., como sólidos en témpanos y nieves o como gas en las nubes (Ingeniería Ambiental & Medio Ambiente, 2000).

2.2.1 Parámetros físicos y químicos más importantes en la calidad del agua

2.2.1.1 Parámetros físicos:

- **Color**

Es producido por la presencia de materiales o sustancias disueltas. Según Chistman y Ghassemi (1961) la aparición de color en el agua puede deberse a la extracción producida por el agua de sustancias provenientes de maderas, la solución de productos de descomposición de las maderas, solución de materia orgánica del suelo o una combinación de estos procesos; en conjunto reciben el nombre de sustancias húmicas.

Este es expresado en Unidades de Color (UC) y es determinado a partir de la comparación visual de la muestra, con concentraciones conocidas de soluciones coloreadas. El método patrón de medida de color es de



cobalto-platino, siendo la unidad de color el producido por 1 mg de platino/L en forma de cloroplatinato. El índice de cobalto-platino puede variarse para equiparar diferentes tonalidades; preparándose patrones con soluciones que tengan colores de 5, 10, y hasta 70 unidades de color (UC) contenidas en tubos nessler de 50 ml. En caso de diluciones, se multiplica el color estimado de la muestra diluida por 50 ml del tubo nessler entre la cantidad de muestra tomada para la dilución en mililitros. (Arboleda, 1992).

- **Turbiedad**

Es la propiedad óptica que tiene una sustancia líquida o sólida, de diseminar en todas direcciones la luz que pasa por ella. Esta definición implica una interrelación entre la luz incidente y la sustancia diseminante. Solo cuando la luz pasa por un líquido ideal homogéneo, no se produce diseminación ninguna del rayo luminoso y por tanto la turbiedad es cero. Esta está constituida principalmente por arcillas, precipitados de hierro y manganeso, materia orgánica y microorganismos, entre otros.

Es determinada a través de métodos turbidimétricos o nefelométricos, que consisten en tomar una muestra de 50 mililitros de agua en una celda de vidrio para luego ser introducida en un turbidímetro que mide su turbiedad; este equipo se basa en la comparación de la intensidad de la luz dispersada por la muestra bajo condiciones definidas con la intensidad de la luz dispersada por una suspensión de referencia estándar bajo las mismas condiciones. El polímero formacina es usado como la suspensión de referencia estándar y su turbiedad es definida como 4000 NTU o 4000 UNT (Unidad Nefelométrica de turbiedad). (Arboleda, 1992).

- **Conductividad**

Esta permite evaluar de forma rápida pero con bastante aproximación la mineralización o sales disueltas en el agua; de allí radica la aplicabilidad para detectar variaciones en la composición del agua. Se expresa en unidades de



microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y se determina midiendo la resistencia eléctrica de una muestra de 50 mililitros de agua a partir de un conductímetro.

El tipo más sencillo de celda de conductividad utilizada consta de dos electrodos similares; la tensión alterna aplicada a uno de los electrodos hace que los iones que se encuentran en la solución se muevan en dirección a dicho electrodo. Mientras más iones haya en la solución, mayor será la corriente que fluye entre los mismos. El conductímetro calcula en base a la corriente medida y a la ley de Ohm la conductancia de la solución y luego tomando en cuenta los datos de la celda, la conductividad (Degrémont, 1979).

- **Sólidos suspendidos**

Este término se aplica al material heterogéneo presente en las aguas que de acuerdo a su tamaño no pueden atravesar una membrana filtrante con tamaño de poro de 1,2 micrómetros aproximadamente. Estos sólidos se determinan tomando una muestra de agua de 250 mililitros que es filtrada a través de crisoles "GOOCH" o filtros de fibra de vidrio con disco de filtrado como medio filtrante; este sistema se encuentra conectado a una bomba de vacío que succiona toda el agua hacia un erlenmeyer con tubuladura lateral.

A continuación se remueve el filtro para ser transferido a un disco para pesaje de aluminio, el mismo es secado en una estufa a $103\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 30 minutos para posteriormente ser trasladado a un desecador. Al finalizar el medio filtrante es pesado en una balanza analítica con la cantidad de material, donde esta es la diferencia del peso de la muestra filtrada seca y el peso del medio filtrante vacío; los mismos son expresado en mg/L (Degrémont, 1979).



- **Sólidos sedimentables**

Los sólidos sedimentables son el grupo de sólidos cuyos tamaños de partícula corresponde a 10 micras o más y que pueden llegar a decantar por su propio peso. Estos en general también incluyen las partículas coloidales que producen turbiedad y su determinación consiste en trasvasar muestra de agua a un cono Imhoff hasta llegar a la marca de los 1000 ml, luego este se coloca en una gradilla para que pueda estar en forma vertical y así obtienen a diferentes tiempos la cantidad de mililitros de sólidos sedimentables por litro de muestra. Estos sólidos son expresados en mL/L (American Water Works Association, Inc., 1971).

2.2.1.2 Parámetros químicos:

- **pH**

Es una medida de la concentración de iones hidrógeno presentes en el agua y su valor se obtiene al dividir la unidad, entre la concentración de iones hidrógeno. El mismo se determina a partir de un pH-metro o equipo de pH de laboratorio y consiste en medir el potencial que se desarrolla a través de una fina membrana de vidrio que separa dos soluciones con diferente concentración de protones; en consecuencia se conoce muy bien la sensibilidad y la selectividad de las membranas de vidrio delante el pH. Una celda para la medida de pH consiste en un par de electrodos, uno de mercurio o cloruro de mercurio y otro de vidrio, sumergidos en la muestra de 50 mililitros en la que queremos encontrar el pH (Veneagua, 2007).

- **Alcalinidad**

Es la medida de la capacidad de un agua para amortiguar o neutralizar ácidos y es debida a la presencia de aniones como bicarbonatos, carbonatos, hidroxilos, provenientes de la disociación de sales de ácidos débiles y bases



fuerentes, también contribuyen a ella los fosfatos, los boratos y silicatos. La alcalinidad se expresa generalmente en mg/L Ca_2CO_3 , dada a la variedad de constituyentes, así como para relacionarla con otras características, por ejemplo, la dureza.

Esta se determina a partir de la toma de una muestra de agua de 50 ml en un matraz de erlenmeyer, agregándole una solución indicadora de verde de Bromocresol de pH 4,5. Luego la muestra es titulada con una solución de ácido sulfúrico 0,02 N hasta el viraje de color azul a color verde manzana y los ml consumidos de ácido son multiplicados por el factor de estandarización del mismo, obteniéndose como resultado la suma de las bases presentes en la muestra como si fueran solamente carbonato de calcio (Degrémont, 1979).

- **Aluminio residual**

El aluminio (Al) es uno de los metales inorgánicos presente en el agua potable. Además de los naturales pertenecientes a las aguas crudas, la utilización de coagulantes de aluminio, basada sobre todo $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (alumbre) a menudo conduce a un aumento de concentraciones del aluminio en el agua tratada. Una alta concentración (3,6 a 6 mg/L) de este puede precipitar como hidróxido de aluminio y llegar a causar trastornos neurológicos como la enfermedad de Alzheimer y la demencia presenil.

Durante los procesos convencionales de tratamiento de aguas, el aluminio sufre diversas transformaciones que están influenciadas por factores tales como el pH, turbidez, temperatura y los compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en el agua. El aluminio residual se puede determinar a partir del método colorimétrico de ericromo cianina R mediante el uso de un espectrofotómetro en muestras de agua de 50 mililitros.

Las soluciones diluidas de aluminio tamponadas a pH 6,0 producen con la tinción de ericromo un complejo de color rojo a rosado que presenta un



máximo de absorción a 535 nm. La intensidad del color del desarrollo depende de la concentración del aluminio, pH, alcalinidad, el tiempo de reacción, temperatura de la muestra. Para compensar el color y la turbidez, se forma un complejo de aluminio de una porción de la muestra con agua destilada para obtener un blanco.

La interferencia de hierro y magnesio, dos elementos que se encuentran frecuentemente en el agua, se elimina por adición de ácido ascórbico. El intervalo óptimo del aluminio oscila entre 20 y 300 mg/L, pero puede extenderse por exceso mediante dilución de la muestra. El mismo es expresado en mg/L (Mecalf & Eddy, 1995).

2.2.2 Componentes de un sistema de abastecimiento de agua potable

La Planta de potabilización de aguas forma parte de un sistema mayor, el sistema de abastecimiento de agua, cuyos componentes se pueden simplificar en tres. Estos están íntimamente ligados, de forma que el comportamiento y funcionamiento de cada uno de ellos afecta al de los otros. En primer lugar, el balance entre las características del agua en la fuente y la calidad del agua deseada define la intensidad del tratamiento. Cada uno de estos componentes de un sistema de abastecimiento puede ser descrito de la siguiente manera:

2.2.2.1 Fuentes de abastecimiento

Las Fuentes de abastecimiento pueden clasificarse en superficiales y subterráneas. Las fuentes de aguas superficiales tienden a ser de calidad variable, muy susceptibles a los cambios estacionales, turbiedad elevada en determinadas ocasiones especialmente al inicio y durante el periodo de lluvia, presentan color y eventualmente materia orgánica productora de olores y sabores. Las aguas subterráneas, por su parte tienden a mantener



características uniformes, contienen grandes cantidades de sólidos disueltos y pocos sólidos suspendidos, que se traducen en baja turbiedad y color aparente. La determinación de esas características define el tipo de tratamiento a realizar (Najul, 2007).

2.2.2.2 Planta de tratamiento

Es el conjunto o secuencia de operaciones y procesos que tienen por finalidad modificar las características del agua en función a la calidad deseada. No existe una combinación única de unidades y la selección de las mismas debe estar basada en el conocimiento del alcance de cada unidad. Las operaciones y procesos a utilizar dependen de las características físicas, químicas y biológicas del agua.

Las partículas suspendidas requerirán de operaciones de clarificación como sedimentadores o filtros, en caso de que dichas partículas requieran tiempos muy largos para su decantación o posean características coloidales, como aquellas productoras de turbiedad, requerirán previamente la adición de sustancias químicas para promover su remoción en alguna de las unidades de clarificación; para ello se pueden utilizar unidades de agitación rápida y agitación lenta previas a estas unidades.

Si la turbiedad es producida por materia orgánica, es preferible pensar en su control en la fuente. La presencia de olores y sabores indeseables podría llevar a pensar en tratamientos como aeración o adsorción. La desinfección permite eliminar organismos patógenos. Este tratamiento es imprescindible en cualquier sistema de potabilización y debe considerar no sólo la producción de un agua libre de organismos patógenos a la salida de la planta, sino la protección a lo largo de la red de distribución.

En el caso de agua con alto contenido de calcio y magnesio, cationes divalentes que pueden precipitar como carbonato de calcio e hidróxido de magnesio respectivamente, deben ser eliminados por procesos de



ablandamiento, como precipitación con cal-soda o intercambio iónico, a fin de evitar las quejas del consumidor y proteger la red de distribución. Antes de la salida del agua de la planta de tratamiento, se debe verificar su estabilidad química y aplicar los correctivos necesarios para evitar deposiciones de capas de carbonato de calcio en las tuberías de distribución (Najul, 2007).

En estos procesos se requiere en algunos casos el uso de sustancias químicas, de allí la importancia de considerar las unidades dosificadoras, las cuales variarán dependiendo del estado físico de la sustancia a añadir. La dosis de sustancias química debe basarse en pruebas a escala laboratorio, que luego son relacionadas con el caudal de operación.

Como puede observarse, dependiendo de lo que se desee remover o añadir se necesitará una u otra unidad de tratamiento. El arreglo o secuencia de dichas unidades no es único, aunque resulta lógica la remoción en función al tamaño de las partículas, comenzando por aquellas de tamaño apreciable, pasando por los sólidos suspendidos y finalmente el material disuelto (Vargas, 2004).

2.2.2.3 Red de distribución

La red de distribución está constituida por las tuberías, tanques, y demás elementos de conexión que permiten el suministro del agua producida. Su mantenimiento y conservación dependen en gran medida de la eficiencia del sistema de tratamiento, donde se produzca un agua que no cause deposiciones, incrustaciones, abrasión, crecimientos biológicos, etc.

Adicionalmente, para evitar la excesiva dosificación de desinfectante en la planta de tratamiento para proveer de concentraciones suficientes que protejan la posibles fuentes de contaminación a lo largo de la red, es recomendable la instalación de estaciones recolectoras, que garanticen la calidad bacteriológica en toda la red. En conclusión, todo el sistema está



interconectado, por tanto la alteración en alguna de sus partes se refleja en el funcionamiento de las otras (Najul, 2007).

2.2.3 Clasificación de las plantas de tratamiento para potabilización de aguas en función de los arreglos existentes en Venezuela

La clasificación de los sistemas de tratamiento para potabilización de aguas adoptada de acuerdo con los arreglos encontrados en las plantas de tratamiento existentes en Venezuela, son:

2.2.3.1 Plantas convencionales

Son sistemas donde los procesos de mezcla rápida, mezcla lenta, sedimentación y filtración se realizan en unidades consecutivas e independientes. La desinfección se realiza mediante la utilización de cloro, en la modalidad de pre y post-cloración. Los procesos de mezcla rápida y mezcla lenta se llevan a cabo de manera hidráulica o mecánica; la sedimentación es de flujo horizontal y los filtros son rápidos de medios mixtos de arena y antracita. Estas unidades se caracterizan por tener área superficial de forma cuadrada o rectangular.

2.2.3.2 Plantas modulares

Son sistemas donde los procesos de mezcla rápida, mezcla lenta y sedimentación se llevan a cabo en unidades separadas, pero cilíndricas y concéntricas, constituidas en concreto postensado y/o acero. El proceso de filtración se produce en una unidad cilíndrica separada e independiente del modulo anterior, construida también en concreto postensado.

En todos los casos para cada unidad de mezcla rápida, mezcla lenta y sedimentación, están dispuestas dos unidades de filtración. El proceso de



mezcla rápida se realiza de forma mecánica o hidráulica, la mezcla lenta es hidráulica mediante codos de 45° para inducir un movimiento circular. La sedimentación es de flujo vertical y el agua clarificada es recolectada mediante un vertedero perimetral; la unidad de filtración es de tipo rápida con medios mixtos de arena y antracita.

2.2.3.3 Plantas compactas

Este tipo de sistemas comprenden aquellas plantas en las cuales todos los procesos y operaciones del tratamiento se realizan en un solo modulo. Dentro de este grupo se distinguen dos modalidades; una tipo 1 donde la configuración es similar a las plantas modulares, es decir cilindros concéntricos. La otra tipo 2, está constituida por dos cilindros concéntricos, uno de los cuales funciona como clarificador, constituido por un lecho arena y el segundo cilindro constituye la unidad filtrante, donde el lecho es mixto con arena y antracita. Generalmente está constituida de acero.

2.2.3.4 Plantas no convencionales

En este tipo de sistema se incluyen a todas aquellas plantas cuyos arreglos no corresponden a los grupos anteriores y adicionalmente donde existen operaciones y procesos diferentes a los de clarificación. En este tipo de plantas se encuentran aquellas con unidades de sedimentación de alta rata con placas paralelas o “colmenas”, que pueden o no funcionar con manto de lodos, filtración rápida de medios mezclados pero con lavado tipo vasos comunicantes, o sea un filtro es lavado con el efluente de otro; filtros de arena distribuidos en celdas y con lavado superficial independiente para cada celda; procesos de aireación para remoción de hierro a través de aireadores de bandejas, cámaras recarbonatadoras, entre otras (Najul, 2007).



2.2.4 Descripción del proceso de potabilización de la planta de tratamiento La Guairita

La Planta La Guairita es de tipo convencional; el proceso inicia cuando el agua cruda es cuantificada mediante un Venturi de 72” de diámetro y conducida por una tubería del mismo diámetro hasta la unidad de coagulación. Previamente antes de ingresar a esta unidad, en la tubería son agregadas las sustancias químicas como: (coagulantes primarios) sulfato de aluminio líquido y sólido y policloruro de aluminio (PAC).

La mezcla se efectúa originalmente mediante agitación hidráulica y en la misma se realiza una pre-cloración, iniciando así el proceso de desinfección del agua (Figura 2.1). Luego el agua se distribuye mediante un canal hacia cada una de las etapas de floculación a través de válvulas tipo mariposa. Las aguas coaguladas ingresan a seis (6) floculadores de (6) etapas c/u, en donde se agrupan las partículas coloidales mediante agitación mecánica e hidráulica.

Una vez lograda la floculación el agua ingresa mediante cámaras de distribución uniforme hasta los sedimentadores en donde precipitan los sólidos suspendidos y el material floculado, los cuales son removidos mediante barrelodos tipo puente móvil y drenado por válvulas de descarga de fondo que operan automáticamente. Los lodos son recolectados y luego de ser conducidos hasta el fondo del mismo salen por el drenaje de los sedimentos, en donde una tubería los traslada hasta el río Guaire ubicado en la ciudad de Caracas.

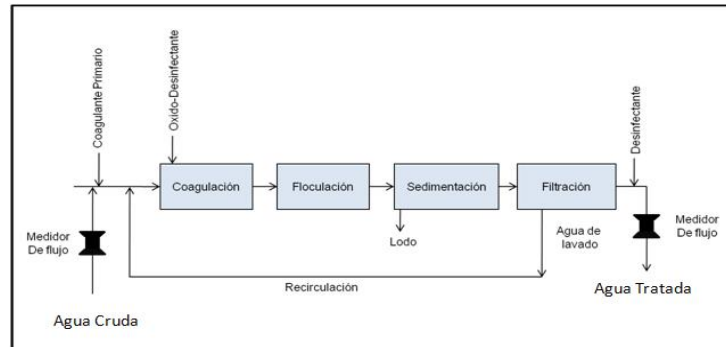


Figura 2. 1 Diagrama general del proceso de potabilización en la planta La Guairita (Ingeniería Briper, C.A, 2001).

El agua sedimentada pasa mediante vertederos horizontales hasta veinticuatro (24) unidades filtrantes para ser filtrado y por último el agua es desinfectada para asegurar que se mantenga su calidad durante su traslado hacia la estación de bombeo 25; estación que distribuirá el agua hacia la ciudad de Caracas (Ingeniería Briper, C.A, 2001).

2.3 Principales tratamientos y equipos utilizados en sistemas de potabilización en plantas de tipo convencional

2.3.1 Oxido-Desinfección

La oxido desinfección del agua consiste en la destrucción de los organismos patógenos causantes de enfermedades. Es de uso importante este tipo de proceso, ya que a causa que el agua cruda contiene diferentes tipos de compuestos orgánicos e inorgánicos, la aplicación de cloro a partir de dosificadores, genera la oxidación y eliminación de los mismos. Este tratamiento puede ser aplicado al inicio (pre-cloración) del tratamiento y al final (post-cloración) con el fin de asegurar la desinfección en las redes de distribución (Ingeniería Briper, C.A, 2001).



2.3.2 Coagulación

El objetivo esencial del proceso de coagulación es desestabilizar las partículas coloidales que se encuentran en el agua (Figura 2.2). Para ello es necesaria la adición de ciertas sustancias químicas llamadas coagulantes primarios o ayudantes de coagulación en cantidades óptimas y una mezcla apropiada para garantizar que el proceso se lleve a cabo en una forma eficiente y pueda garantizar que el proceso de floculación se desarrolle adecuadamente (Ingeniería Briper, C.A, 2001).

La coagulación ocurre en cámaras abiertas en donde se produce una mezcla rápida; esta puede efectuarse mediante turbulencia, provocada por medios hidráulicos o mecánicos, tales como: resaltos hidráulicos en canales, canaleta Parshall, vertederos rectangulares, tuberías de succión de bombas, mezcladores mecánicos en línea, rejillas difusoras, chorros químicos y tanques con equipos de mezcla rápida (Mecalf & Eddy, inc., 1995).

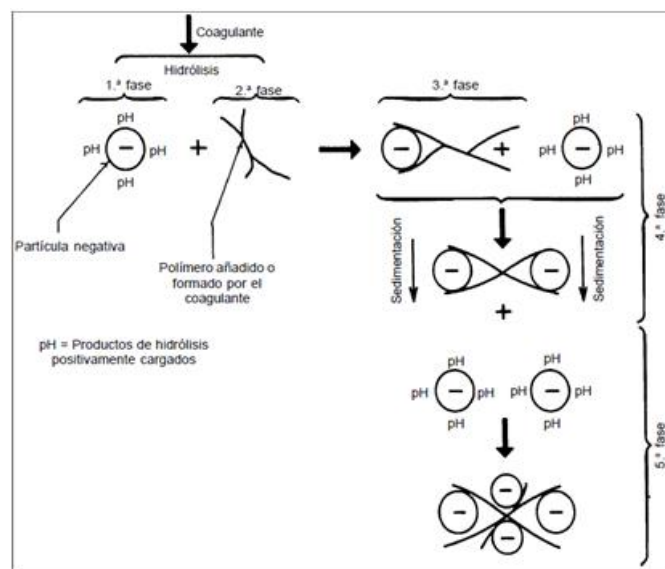


Figura 2. 2 Modelo esquemático del proceso de coagulación (Vargas, 2004).



2.3.2.1 Coagulante

Los coagulantes son ampliamente utilizados en tratamientos de agua para algunos propósitos diferidos. Su uso principal es para desestabilizar suspensión de partículas e incrementar la tasa de formación de flóculos. Las sales coagulantes hidrolizantes metálicas son utilizadas también para formar precipitado floculante que adsorben ciertos materiales inorgánicos, como los fosfatos, fluoruros y compuestos de arsénico.

La cantidad de coagulante óptimo se refiere a la cantidad de coagulante necesario para que los coloides que se encuentren en el agua formen mediante el proceso de coagulación-floculación un flóculo fuerte que no se desintegre a medida que se vaya desarrollando el proceso de clarificación y luego la filtración del agua se pueda efectuar de forma correcta.

Los productos químicos comúnmente empleados como coagulantes en el tratamiento de aguas son: el sulfato de aluminio, el cloruro férrico, y el sulfato ferroso y férrico. El más utilizado en el proceso de potabilización es el sulfato de aluminio; este es una sal derivada de una base débil (hidróxido de aluminio) y de un ácido fuerte (ácido sulfúrico), por lo que sus soluciones acuosas son muy ácidas; su pH varía entre 2 y 3,8, según la relación molar sulfato/alúmina. Por esta razón, su almacenamiento debe hacerse en un lugar seco, libre de humedad. Es efectivo en intervalos de pH 6 a 8.

Puede estar en forma sólida o líquida. La sólida se presenta en placas compactas, gránulos de diverso tamaño y polvo; su fórmula teórica es $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$. Su concentración se define, en general, por su contenido en alúmina, expresada en Al_2O_3 , es decir, 17% aproximadamente. La densidad aparente del sulfato de aluminio en polvo es del orden de 1.000 kg/m^3 . El contenido en alúmina Al_2O_3 de la forma líquida fluctúa generalmente entre 8 y 8,5%; es decir, 48 a 49% en equivalente polvo o también 630 a 650 g de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ por litro de solución acuosa y su densidad es aproximadamente 1320 kg/m^3 (Vargas, 2004).



2.3.2.2 Teoría de Coagulación

La desestabilización de partículas coloidales, se dice que comienza desde el mismo instante de la aplicación de coagulante y transcurre durante unos pocos segundos. Consiste básicamente en una serie de reacciones físicas y químicas entre los coagulantes, las partículas y los otros constituyentes del medio. Existen dos modelos que tratan de explicar esta etapa: el modelo físico de la Doble Capa y el modelo del Puente Químico.

- **Modelo físico de la doble capa**

El sistema coloidal no presenta carga eléctrica “líquida” debido a que la carga de superficie negativa es balanceada con los iones de carga contraria presentes en el agua. La figura 2.3 muestra una representación esquemática de una partícula coloidal negativa con una nube de iones alrededor de la misma. Como la superficie de la partícula es negativa, hay un cúmulo de iones positivos en la región de interfaz (sólido-líquido) que forman, junto con la carga negativa de la partícula, la doble capa eléctrica, también denominada capa compacta.

Los iones negativos se aproximan a la capa compacta y atraen iones positivos; así se forma la capa difusa, que engloba a la primera y resulta de la atracción de iones positivos, de la repulsión electrostática de iones negativos (con la misma carga de la partícula) y la difusión térmica. Se tiene, por tanto, una concentración elevada de iones positivos próximos a la superficie del coloide, también denominada capa de Stern, a partir de la cual se forma la capa difusa, en la cual la concentración de iones es menor.

El potencial Electrocinético o Potencial Z se traduce como la energía requerida para traer una carga unitaria desde el infinito hasta la llamada superficie de corte y es quien determina las propiedades electrocinéticas de la solución coloidal, tales como estabilidad y velocidad de migración al ser sometidas a un campo eléctrico (Vargas, 2004).

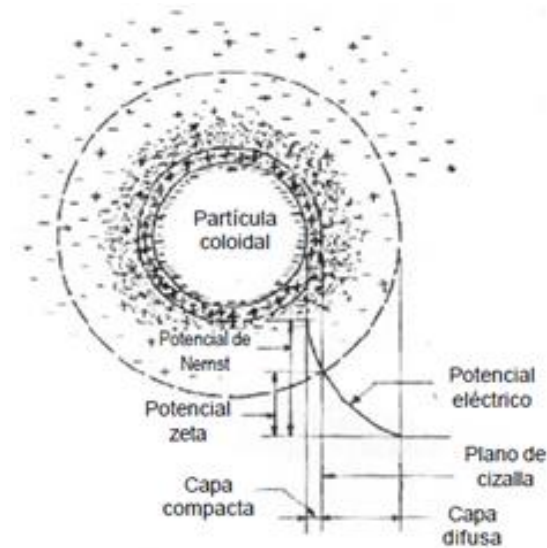


Figura 2. 3 Configuración esquemática de la Doble Capa eléctrica (Vargas, 2004).

- **Modelo del puente químico**

Este modelo se basa en la desestabilización de las partículas coloidales por macromoléculas que se adhieren a su superficie, independientemente de la carga eléctrica. En este caso el efecto de desestabilización se debe más a la interacción química entre grupos químicos presentes en la superficie del coloide que a una adsorción de contraiones en la doble capa.

La figura 2.4 muestra en forma esquemática los pasos para la desestabilización de la partícula coloidal por una macromolécula o polímero. También explica la reestabilización bien sea por agitación excesiva o por aplicación de coagulante en exceso, así como las posibilidades de ruptura de los flóculos una vez formados, por una agitación excesiva (Vargas, 2004).

2.3.3 Floculación

Esta promueve el acercamiento entre las partículas desestabilizadas para que se aglomeren, aumenten su tamaño y peso y puedan decantar



posteriormente en las unidades de clarificación. Esto se logra a partir de una mezcla suave de las partículas ya desestabilizadas para incrementar la tasa de encuentros o colisiones entre ellas sin romper o disturbar los agregados preformados. La floculación es influenciada por fuerzas químicas y físicas tales como la carga eléctrica de las partículas, la capacidad de intercambio, el tamaño y la concentración del flóculo, el pH, la temperatura del agua y la concentración de electrolitos.

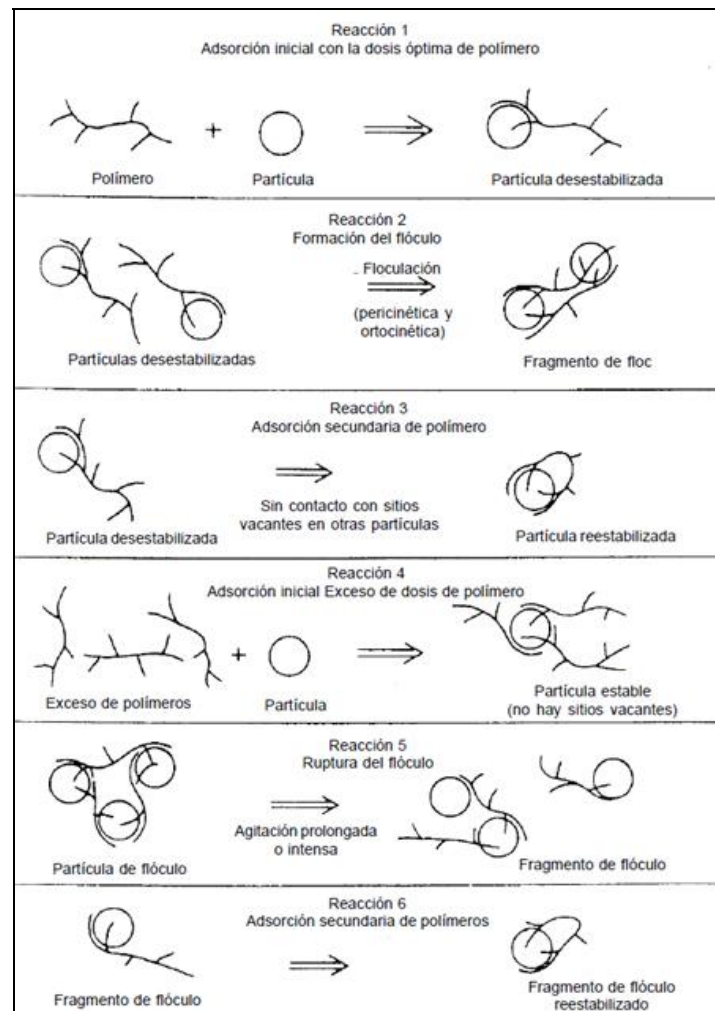


Figura 2. 4 Representación esquemática del modelo de puente químico (Vargas, 2004).



El proceso de floculación viene dado luego de que ocurre la coagulación en la mezcla rápida. La misma ocurre en tanques con algún medio de mezcla suave, con un tiempo de retención relativamente prolongado. Existen 4 tipos de floculadores: hidráulicos (movimiento de flujo en forma vertical u horizontal a partir de tabiques o baffles), mecánicos (por medio de agitadores mecánicos como turbinas, hélices o paletas), giratorios (sistema de paletas adheridas a un eje) y reciprocantes (serie de cintas o parrilla colocadas en balancín) (tabla 2.1) (Arboleda, 1992). Los tipos de floculación son:

- **Floculación Pericinéctica**

El movimiento browniano promueve los contactos o choques entre las partículas. Esta propiedad afecta principalmente las partículas más pequeñas, inferiores a $1\ \mu\text{m}$ (American Water Works Association, Inc., 1971).

- **Floculación Ortocinéctica**

En este caso los choques entre partículas son promovidos por el movimiento inducido en el fluido a través de una agitación lenta. Son susceptibles las partículas mayores a $1\ \mu\text{m}$ y existen modelos que expresan la relación entre el número de colisiones por unidad de tiempo y los gradientes de velocidad. Es importante resaltar, que si bien el gradiente de velocidad promueve las colisiones, también pueden producir la ruptura y disgregación de los flóculos ya formados (American Water Works Association, Inc., 1971).



Tabla 2. 1 Ventajas y desventajas de los floculadores Mecánicos e hidráulicos (Najul, 2007)

MECANICOS	HIDRAULICOS
DESVENTAJAS	
<ol style="list-style-type: none">1. Requiere suministro de energía.2. Por ser equipos mecánicos requieren de operación y mantenimiento.3. Por su característica de reactor mezcla completa, tiende a ser menos eficientes.4. Tendencia a formar cortocircuitos.	<ol style="list-style-type: none">1. Poco flexibles2. Generan pérdidas de carga para lograr la turbulencia.3. En general, ocupan áreas mayores.
VENTAJAS	
<ol style="list-style-type: none">1. Son flexibles.2. No producen pérdida de carga.3. En general, requieren áreas menores.	<ol style="list-style-type: none">1. Poca tendencia a formar cortocircuitos.2. Mantenimiento sencillo.3. Por su característica de reactor flujo pistón tiende a ser más eficiente.4. No requieren suministro de energía.

2.3.4 Sedimentación

Se designa por sedimentación la operación por la cual se remueven las partículas sólidas de una suspensión mediante la fuerza de gravedad en un tiempo determinado llamado “tiempo de sedimentación”. En esta etapa se espera que todos aquellos flóculos formados en el proceso de floculación, sedimenten para obtener un agua que solo contenga partículas muy finas, que puedan ser removidas en la filtración. Existen 4 tipos de sedimentación: tipo I, tipo II, zonal y compresión (Arboleda, 1992).

Los sedimentadores son tanques abiertos en donde ocurre la sedimentación o decantación de los sólidos suspendidos de las aguas floculadas por la acción exclusiva de la gravedad. Con la ayuda de puentes



barrelados o sistemas de limpieza estas partículas luego de llegar al fondo de los sedimentadores, son barridos o llevados hacia el drenaje del mismo con el fin de ser eliminadas del proceso. Existen diferentes tipos de sedimentadores, estos pueden ser: tanques rectangulares de flujo horizontal, tanques circulares, sedimentadores de recirculación de lodos, sedimentadores turbocirculares, sedimentadores aceleradores y sedimentadores laminares (Rojas, 2000).

2.3.4.1 Componentes de la unidad de sedimentación

Una unidad de sedimentación consta de las siguientes zonas, con diferentes funciones específicas, las cuales se muestran en la figura 2.5 (Rojas, 2000):

- **Zona de entrada**

La zona de entrada en un sedimentador es un conjunto de estructuras que debe permitir una distribución uniforme del flujo de agua hacia la zona de sedimentación. En una unidad de sedimentación convencional de flujo horizontal, esta distribución uniforme debe darse a todo lo ancho de la unidad y en profundidad.

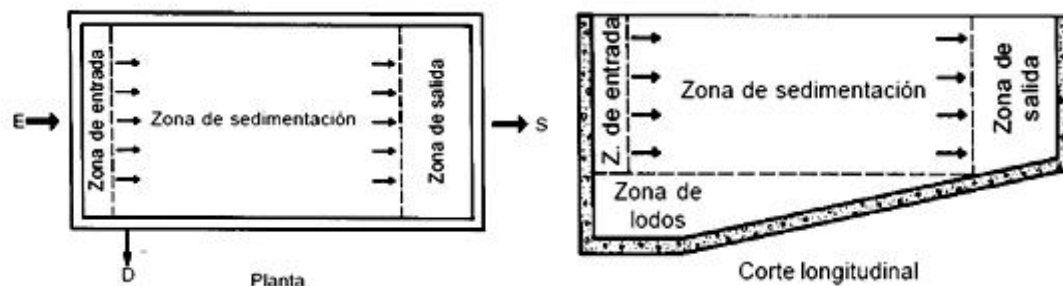


Figura 2. 5 Esquema de la zonificación de un sedimentador rectangular (Rojas, 2000).



- **Zona de sedimentación**

En esta zona se debe tener un número de Reynolds lo más bajo posible para tender a un flujo laminar y estabilizar el flujo. En esta zona las líneas de flujo no deben encontrarse con ningún tipo de obstrucciones que alteren su trayectoria de manera que las fuerzas que influyan sobre las partículas sean las de arrastre horizontal y la gravedad.

- **Zona de salida**

Esta zona se caracteriza por permitir una recolección uniforme de agua clarificada a una velocidad tal que evite arrastrar flóculos en el efluente. Canaletas de pequeña longitud, mal ubicadas, mal niveladas o impropiedades diseñadas producen cortocircuitos hidráulicos y zonas muertas que pueden inutilizar grandes áreas de los sedimentadores.

- **Zona de lodos**

Esta zona se encuentra en el fondo del tanque de sedimentación, la superficie presenta una inclinación o rascadores de modo que los lodos depositados sean llevados hasta un pozo o un canal, de donde son retirados por bombeo.

2.3.5 Filtración

La filtración es un proceso que remueve el material suspendido. El propósito fundamental de este proceso es retener todas aquellas partículas que no fueron precipitadas en el sedimentador y obtener agua con turbiedad dentro de las normas de calidad (Veneagua, 2007). El filtro es un equipo de operaciones unitarias por la cual se realiza la filtración, el mismo consta de un medio filtrante (pantalla, tela, papel o un lecho de sólidos (arena-antracita)) que tiene como función trabajar como una barrera que permita que pase el líquido, mientras retiene la mayor parte de los sólidos. Los filtros



utilizados en sistemas de potabilización son generalmente filtros profundos los cuales se clasifican según se indica en la tabla 2.2 (Metcalf & Eddy, inc., 1995).

Tabla 2. 2 Clasificación de filtros profundos (Najul, 2007)

PARÁMETRO	CLASIFICACIÓN
Según la velocidad de filtración	Lentos
	Rápidos
Según el sentido del flujo	Ascendentes
	Descendentes
Según la carga	Gravedad
	Presión
Según el material filtrante	Arena
	Mixtos: arena – antracita
	Mixtos: arena – antracita - granate

Existen varios tipos de filtración entre ellos la filtración estándar, la microfiltración, la ultrafiltración, la nanofiltración y finalmente la ósmosis inversa de mayor a menor tamaño de corte de partícula (Veneagua, 2007).

2.4 Factores que afectan el proceso de coagulación y floculación

2.4.1 pH

El pH modifica el grado de ionización de los grupos químicos que se encuentran tanto en la superficie coloidal como en las cadenas polimérica, de modo de favorecer o inhibir la formación de los puentes químicos. De esta manera, dependiendo del coagulante utilizado, existe un intervalo de pH óptimo para la formación de los flóculos (Najul, 2007).



2.4.2 Alcalinidad

Cuando se utilizan coagulantes metálicos, éstos después de hidrolizarse reaccionan con la alcalinidad del agua para formar compuestos inestables que polimerizan y ácidos débiles. De no existir la alcalinidad, la reacción se daría con las moléculas de agua y se producirían ácidos fuertes que tenderían a bajar bruscamente el pH; de esta manera la alcalinidad actúa como amortiguador para controlar las variaciones de pH.

2.4.3 Temperatura

Influye en la posición de la barrera de energía, pero su influencia no es tan marcada en la desestabilización, como en el transporte de las partículas. En el caso de la floculación pericinetica aumenta el coeficiente de difusión como consecuencia del movimiento de las partículas según el movimiento Browniano, por lo tanto la probabilidad de colisiones es mayor. En la floculación ortocinetica disminuye la viscosidad, incrementándose así el transporte y probabilidad de choques entre las partículas (Najul, 2007).

2.4.4 Turbiedad

El grado de turbiedad, o sea, la concentración de coloides influye en el tipo de coagulante a aplicar y en la dosis, aunque no exista una relación estequiométrica entre una y otra. En general, si se grafica dosis de coagulante vs. concentración de coloides se obtiene una grafica como la figura 2.6. Cuando la turbiedad es muy baja, se requieren cantidades altas de coagulante para poder iniciar la coagulación, esto es para incrementar la probabilidad de choques o de puentes químicos. A medida que aumenta la turbiedad disminuye la dosis de coagulante. Para el caso del rango de mayor



turbiedad, generalmente existe una relación directa entre la dosis de coagulante y la concentración de los coloides (Najul, 2007).

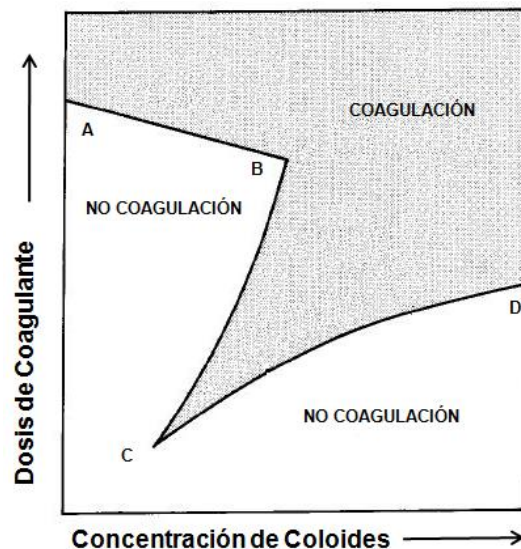


Figura 2. 6 Relación dosis de coagulante vs. concentración de coloides (Najul, 2007).

2.4.5 Concentración de coagulantes

Podría pensarse que a mayor concentración de coagulante, mayor efectividad en el proceso de coagulación. Esto, aparte de resultar antieconómico por el consumo excesivo de coagulantes y la mayor producción de lodos, puede dar resultados adversos. Simulando el proceso de coagulación – floculación – sedimentación a través de pruebas de jarra y luego determinando la turbiedad residual, se grafica turbiedad residual vs. concentración de coagulante, dando como resultado el grafico que se presenta en la figura 2.7 (Najul, 2007).

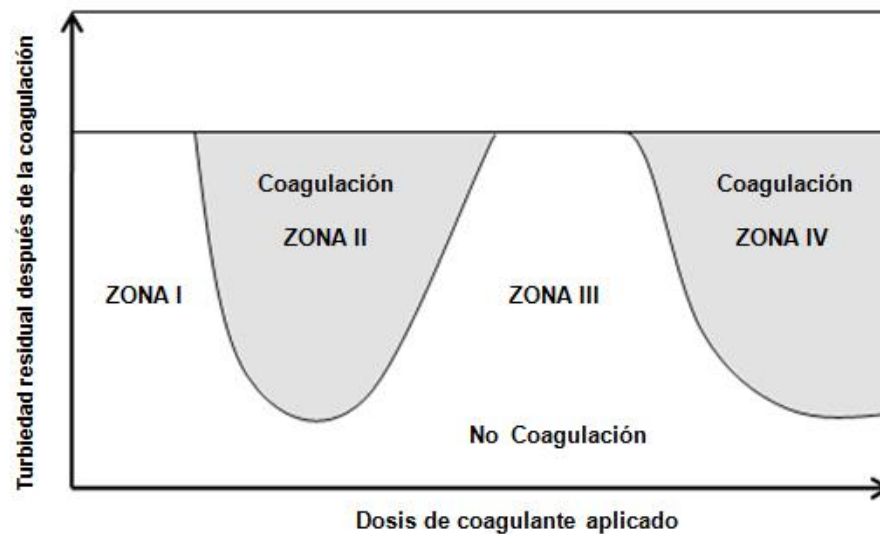


Figura 2. 7 Remoción de turbiedad en función de la dosis de coagulante aplicada (Najul, 2007).

En la figura 2.7 Se observan cuatro zonas:

ZONA I. Dosificación insuficiente de coagulante, por tanto no se alcanza la desestabilización de las partículas coloidales.

ZONA II. Buena remoción de turbiedad (dosis óptima).

ZONA III. Reestabilización de las partículas coloidales por aplicación de coagulante en exceso.

ZONA IV. Remoción de turbiedad por acción de barrido (uso excesivo de coagulante antieconómico)



2.4.6 Tiempo de retención

Se requiere un tiempo de retención adecuado para la desestabilización de las partículas coloidales, así como para la promoción de choques que provoquen la aglomeración de las partículas coloidales en las etapas de coagulación y floculación. Los tiempos de retención oscilan alrededor de un minuto para las unidades de agitación rápida y entre 15 y 45 minutos para la agitación lenta. Este tiempo también puede ser determinado en el área de sedimentación y el mismo indica el tiempo en que el agua permanece dentro de los decantadores y en que se llegan a remover la mayor cantidad de flóculos. Este término depende principalmente del volumen del tanque y caudal de flujo; puede ser calculado de la siguiente forma (Rojas, 2000):

$$t_r = \frac{V}{Q} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde;

t_r = Tiempo de retención (s, min)

V = Volumen del tanque (m^3)

Q = Caudal de flujo (m^3/s)

2.4.7 Gradientes de velocidad

El gradiente de mezcla o gradiente de velocidad, comúnmente indicado por la letra G , es una razón de deformación del fluido que puede ser fácilmente calculado por la ecuación de Camp y Stein; estos propusieron un esquema para comprender mejor la expresión de gradiente de velocidad ' G '. Ellos consideran un pequeño cubo de agua, de dimensiones dx , dy y dz , sobre el cual actúan fuerzas de corte por acción de la velocidad supuestas en la dirección ' x ' y fuerzas de presión como se muestra en la figura 2.8.

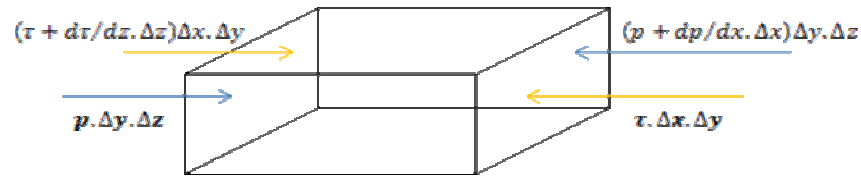


Figura 2. 8 Interacción entre la fuerzas de corte por acción de la velocidad y las fuerzas de presión (Arboleda, 1992).

Igualando las fuerzas se tiene:

$$\frac{d\tau}{dz} = \frac{dp}{dx} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Suponiendo que el cubo puede girar por efecto de un par de fuerzas, se origina una potencia por unidad de volumen:

$$P = \tau \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \frac{du}{dz} \quad \rightarrow \quad \frac{P}{V} = \tau \cdot \left(\frac{du}{dz} \right) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Por definición:

$$\tau = \frac{\text{Fuerzas de viscosidad}}{\text{Superficie}} = \frac{\mu \frac{du}{dz}}{S} = \mu \frac{du}{dz} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Luego:

$$G = \frac{du}{dz} \quad \rightarrow \quad \frac{P}{V} = \mu \left(\frac{du}{dz} \right)^2 = \mu \cdot G^2 \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Se obtiene:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

donde:

μ = coeficiente de viscosidad dinámica

P = Potencia total disipada en el coagulador o floculador

V = Volumen total del reactor



El mismo puede ser calculado también a partir del tiempo de retención que implica el caudal de alimentación a la mezcla rápida o mezcla lenta, quedando una ecuación de la siguiente manera:

$$G = \sqrt{\frac{\gamma H}{\mu t}} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

donde:

μ = coeficiente de viscosidad dinámica

H = Pérdidas por cargas

γ = Peso específico del agua

t = Tiempo de retención

En el caso de la agitación hidráulica y mecánica, la magnitud de los gradientes de velocidad es un factor determinante en el proceso de coagulación – floculación. Para la mezcla rápida se requieren gradientes elevados para que ocurra la dispersión casi instantánea del coagulante. Sin embargo, un gradiente excesivamente alto puede provocar la reestabilización de las partículas y no producir la floculación. La mezcla lenta, por su parte, requiere de gradientes bajos para evitar la ruptura de los flóculos, pero no tanto como para no promover el encuentro entre las partículas y lograr una probabilidad de choques muy baja, así como una eventual precipitación en la unidad de mezcla lenta (Arboleda, 1992).

2.5 PRUEBA DE JARRAS

Las prueba de jarras son ensayos de fijación de tratamientos a escala de laboratorio; estos permiten predecir los resultados del proceso de potabilización. A pesar de sus limitaciones de escala y su modalidad por carga a diferencia de los procesos reales que son continuos, permiten además de determinar la dosis óptima de sustancias químicas, realizar



ajustes en los gradientes de velocidad y tiempos de retención utilizados en el proceso real en las plantas potabilizadoras.

Aunque no es un requisito indispensable, estas pruebas, en la mayor parte de los casos, son realizadas en equipos comerciales y uno de los más conocidos es el equipo de velocidad variable fabricado por la Phipps & Bird (Figura 2.9), para el cual se han desarrollado los ábacos que relacionan el gradiente de velocidad con la velocidad de rotación de las paletas.



Figura 2. 9 Equipo de prueba de jarras Phipps & Bird.

Normalmente estos equipos constan de los siguientes elementos:

- Un agitador mecánico provisto con tres a seis paletas, capaz de operar a velocidades variables (de 0 a 100 revoluciones por minuto; actualmente pueden obtenerse equipos que operan con velocidades de hasta 400 revoluciones por minuto).
- Un iluminador de flóculos localizado en la base del agitador del equipo.
- Vasos de precipitado de 2 litros de capacidad de cristal refractario.



Las unidades de agitación múltiple usadas en las pruebas de coagulación deben ser equipadas con las facilidades necesarias para la adición de coagulantes químicos en forma rápida y simultánea a cada vaso o jarra. Una manera simple es medir las cantidades de coagulante que se van a aplicar a cada jarra con una pipeta y verterlo en vasitos, de los cuales se succiona mediante jeringas hipodérmicas desechables, provistas de su aguja y suministradas por dos o tres personas.

En general, se recomienda aplicar la dosis de coagulante muy cerca del agitador, con el equipo operando con el gradiente de mezcla y aplicando exactamente lo que se debe efectuar en el mezclador de la planta. Los equipos de prueba de jarras automáticos, que permiten velocidades de hasta 300 revoluciones por minuto, son ideales para efectuar simulación de procesos, y en ellos la bondad de los resultados depende mucho de la exactitud con la que se ejecuta la prueba (Vargas, 2004).

2.5.1 Tiempo de sedimentación

Este término pertenece a la etapa de sedimentación en la prueba de jarras y el mismo representa el tiempo en que la mayoría de las partículas formadas en la floculación (flóculos) decantan o sedimentan en caída libre a través del líquido (Najul, 2007).

2.6 Factores que afectan el proceso de sedimentación

La sedimentación es el principal proceso utilizado en el tratamiento de agua para separar sólidos de líquidos, debido especialmente a su gran eficiencia remocional. La eficiencia de los mismos puede llegar a ser clasificada de acuerdo a su calidad del agua producida (Tabla 2.3). Los factores más importantes que afectan la eficiencia remocional de una unidad de sedimentación y/o decantación son: a) Las características del proceso y b)



las condiciones del flujo hidráulico; los cuales a su vez dependen de (Najul, 2007):

- a) Las características físico-químicas de las aguas, especialmente turbiedad (Tabla 2.3), color y temperatura.
- b) Las características del pretratamiento: mezcla – floculación.
- c) De la configuración y diseño de las unidades y zonas de entrada, sedimentación, deposito de lodos y salida de agua.
- d) Las características de las obras de interconexión.
- e) Operación y mantenimiento.

Tabla 2. 3 Clasificación de sedimentadores en función de la calidad de agua producida (Najul, 2007)

EFICIENCIA	TURBIEDAD DE AGUA SEDIMENTADA (NTU)
Excelente	< 5
Muy Buena	5 – 10
Buena	10 - 15
Regular	>15

Entre los diferentes factores que influyen en la eficiencia de una unidad de sedimentación y/o decantación (Tabla 2.4), se han seleccionado los siguientes parámetros como más importantes:

- Calidad del agua sedimentada
- Calidad del agua cruda
- Carga superficial



- Pre-tratamiento
- Operación
- Características hidráulicas

Tabla 2. 4 Interferencias en el proceso de sedimentación (Arboleda, 1992)

Tipos de Interferencia	Causa	Producen
Corrientes de densidad	Corrientes térmicas	Cortocircuitos superficiales o cortocircuitos de fondo
	Corrientes de concentración	Giros de la masa de agua
Corriente eólicas	Vientos que impulsa la masa superficial	Desvíos del flujo superficial
Corrientes cinéticas	Alteraciones hidráulicas en la entrada	Flujos transversales en el tanque
	Obstrucciones en la zona de decantación	Turbulencias que levantan el flóculo
	Alteraciones de salida	Succión de partículas

CAPITULO III

DESARROLLO DEL PROYECTO

Para el desarrollo de este proyecto se hizo necesaria la elaboración de análisis experimentales, simulaciones del proceso en el laboratorio, muestreos de campo y medición de unidades para determinar las magnitudes, volumen y áreas de los coaguladores, floculadores y sedimentadores en planta, con la finalidad de obtener información que permitiera la evaluación de la influencia del gradiente de mezcla en una planta de potabilización, considerando la dosis mejorada, el régimen hidráulico y la calidad del agua.

Para la realización de los análisis experimentales se hizo uso del laboratorio de calidad de la planta potabilizadora La Guairita; tanto los muestreos como las visitas de campo fueron realizados en las instalaciones de la misma. Las fuentes teóricas se obtuvieron a partir del uso de libros de texto, trabajos de grado previos, manuales, tutoriales y publicaciones en internet con la intención de tener información concisa para el desarrollo de la investigación.

3.1 Cálculo de gradientes de mezcla y tiempos de retención en las diferentes unidades del proceso

La producción de agua potable a partir del abastecimiento de aguas contaminadas por sustancias introducidas naturalmente o como resultado de las actividades del hombre, implica una serie de procesos unitarios. Entre estos, uno de los más importantes es el de coagulación y floculación; donde la primera ayuda a la desestabilización de partículas coloidales productoras de turbiedad y en la segunda se promueve el acercamiento entre las partículas



desestabilizadas para que se aglomeren, aumenten de tamaño y peso y puedan decantar posteriormente en las unidades de sedimentación.

El factor más importante dentro de estos dos procesos es el gradiente de mezcla o gradiente de velocidad, que consiste en un consumo de energía para producir turbulencia hidráulica o mecánica dentro de los tanques de coagulación y floculación. El mismo se aplica de diferentes formas en cada uno de estos procesos. Para la coagulación se necesita de una mezcla rápida que se logra utilizando un alto gradiente de mezcla, a diferencia del proceso de floculación que requiere de una mezcla lenta a partir del uso de un bajo gradiente.

3.1.1 Sistema de potabilización del agua en la planta La Guairita

La Planta de potabilizadora Ciudad de Caracas La Guairita cuenta con un sistema de potabilización convencional, es decir; por dos unidades de coagulación (mezcla rápida), seis (6) unidades de floculación (mezcla lenta), seis (6) unidades de sedimentación y veinticuatro (24) unidades de filtración. Se inicia el proceso con la mezcla rápida que está dividida en dos unidades; la primera de ellas es un sistema de tuberías de 72 pulg de diámetro en donde es inyectado el coagulante sulfato de aluminio líquido y la segunda es una tanquilla de mezcla rápida o coagulador donde es inyectado el coagulante sulfato de aluminio sólido y policloruro de aluminio.

Luego el agua es canalizada hacia la etapa de floculación, que opera de forma hidráulica a través de baffles conformados por tablas de madera ubicados a lo largo del floculador y mecánica por medio de ejes con paletas que le suministran un movimiento extra a la misma. Luego el agua entra en la etapa de sedimentación donde cada sedimentador está constituido por un barrelo que facilita la eliminación de los lodos transportándolos hasta un drenaje. Finalmente el agua sedimentada es llevada hacia veinticuatro (24) unidades filtrantes que eliminarán partículas suspendidas o coloidales que aún quedan



luego de la sedimentación. En este proyecto solo fueron estudiadas las etapas de coagulación, floculación y sedimentación (Figura 3.1).

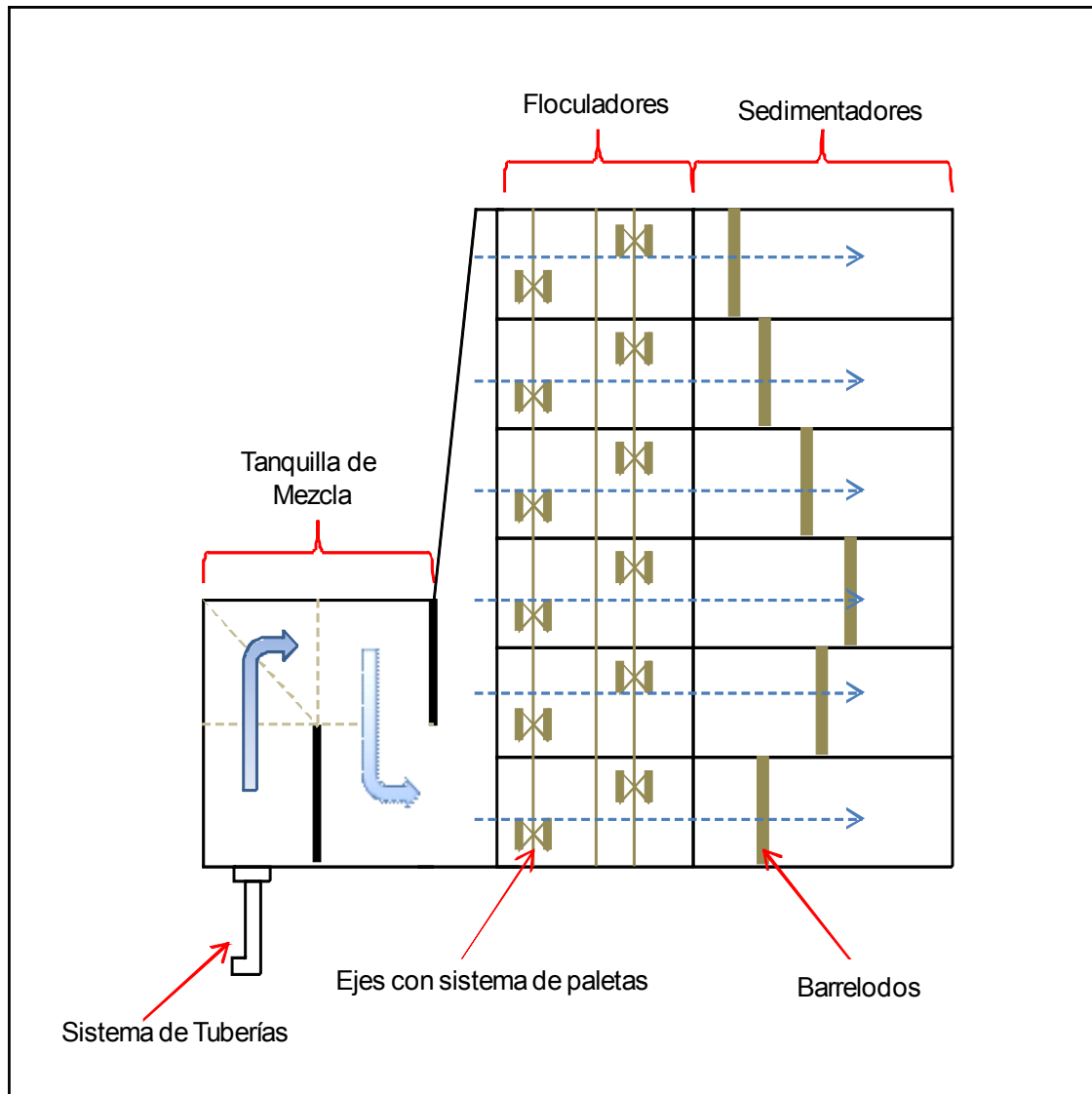


Figura 3.1 Esquema de las etapas estudiadas en el sistema de potabilización de la planta La Guairita (Ingeniería Briper, C.A, 2001).



3.1.2 Gradiente de mezcla hidráulico y tiempo de retención en sistema de tuberías

La primera unidad de mezcla rápida está conformada por dos (2) tramos de tubería de acero al carbono de 72 pulg, con 12,19 y 6,89 m de longitud respectivamente ambos tramos se conectan por un codo de 90° para formar un sistema de tuberías que finaliza en un ducto de concreto, en el cual ocurre una expansión brusca que une al sistema con la tanquilla de mezcla rápida.

En esta etapa de la mezcla rápida el trabajo efectuado para distorsionar las líneas de flujo es producido a partir de pérdidas de energía denominadas pérdidas por carga, las cuales son causadas por los 2 tramos de tubería, un codo de 90° y una expansión brusca localizada a la entrada de la tanquilla de mezcla (Figura 3.1). La potencia disipada (gradiente de mezcla) en los coaguladores y floculadores hidráulicos puede calcularse a partir de la siguiente ecuación:

$$G = \sqrt{\frac{\gamma \times H}{\mu \times tr}} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

donde:

G = gradiente de mezcla (s^{-1})

γ = peso específico del agua (N/m^3)

H = pérdidas por carga totales (m)

μ = viscosidad dinámica del agua ($N.s/m^2$)

tr = tiempo de retención (s)



3.1.2.1 Pérdidas por carga en sistema de tuberías

Las pérdidas por carga presentes en este sistema son: pérdidas por fricción debido a tramos rectos que corresponde a los tramos de tubería y las pérdidas por fricción debido a accesorios que los representa el codo de 90° y la expansión brusca.

- **Pérdidas por fricción debido a tramos rectos (h_L)**

Las pérdidas por fricción debido a tramos rectos se calculan a partir de la siguiente fórmula:

$$h_L = \frac{1}{2} \times \frac{v^2}{g_c} \times \frac{f}{R_H} \times \sum_{i=1}^n L_i \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

R_H = radio hidráulico (m)

f = factor de fricción

v = velocidad ($\frac{m}{s}$)

g_c = factor gravitacional de conversión = $9,81 \frac{Kgm}{Kgf} \times \frac{m}{s^2}$

L_i = longitud de tubería (m)

El radio hidráulico de las tuberías es igual a la cuarta parte de su diámetro, si el diámetro de la misma es igual a 72 pulg, se obtiene que:

$$R_H = \frac{72 \text{ pulg} \times \frac{0,3048m}{12\text{pulg}}}{4} = 0,4575 \text{ m}$$



La velocidad del agua que se transporta a través de la tubería viene dado por el caudal de entrada que se tenga en la planta en ese momento; ya que la misma trabaja a diferentes caudales, para efecto ilustrativo de cálculos se trabajará con un caudal de 6.200 l/s , la cual es uno de los caudales de operación más usados. Entonces la velocidad será igual al caudal de alimentación entre el área de la tubería:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

$$v = \frac{6.200 \text{ L/s} \times \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1.000 \text{ L}}\right)}{\frac{\pi \times 72 \text{ pulg} \times \left(\frac{0,3048 \text{ m}}{12 \text{ pulg}}\right)}{4}} = 2,36 \text{ m/s}$$

Si en el sistema se tienen dos tramos de tuberías, el tramo A y B con longitudes de 12,19 m y 9,83 m respectivamente con un factor de fricción de 0,00951 según la figura A.1; se sustituye en la ecuación 3.2 y se obtiene que las pérdidas por carga debido a la fricción en las tuberías son:

$$h_L = \frac{1}{2} \times \frac{(2,36 \text{ m/s})^2}{9,81 \frac{\text{Kgm}}{\text{Kgf}} \times \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \times \frac{0,00951}{0,4575 \text{ m}} \times (12,19 + 9,83) \text{ m}$$

$$h_L = 0,1296 \text{ m}$$



- **Pérdidas por fricción debido a los accesorios (h_r)**

Las pérdidas por fricción debido a los accesorios se calculan a partir de la siguiente fórmula:

$$h_r = \frac{1}{2} \times \frac{v^2}{g_c} \times \sum_{i=1}^n e_i \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Donde:

v = velocidad ($\frac{m}{s}$)

g_c = factor gravitacional de conversión = $9,81 \frac{kgm}{kgf} \times \frac{m}{s^2}$

e_i = coeficientes de resistencia para cada accesorio

Los accesorios para el sistema de tuberías son: un codo de 90° y la expansión brusca que ocurre a la entrada de la tanquilla de mezcla. El coeficiente de resistencia para un codo de 90° se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$K = 30 \times f \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Donde f es el factor de fricción debido al codo de 90° y siendo este del mismo material y diámetro que las tuberías, $f = 0,00951$; sustituyendo en la ecuación 3.5 se obtiene que el coeficiente de resistencia en el codo será de 0,2853. Las pérdidas por fricción generadas por la expansión brusca son calculadas a partir de la relación del área menor con la mayor de los extremos del medidor. A_1 representa el área menor con un valor de $4,579 \text{ m}^2$ y A_2 la mayor con un valor de $59,637 \text{ m}^2$.



Entonces;

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{4,579 \text{ m}^2}{59,637 \text{ m}^2} = 7,678 \times 10^{-2} \approx 0,08 \quad (\text{Ec 3.6})$$

Según la figura 3.2 y la relación de áreas se obtiene que el coeficiente de resistencia en la expansión brusca (K_L) es aproximadamente 0,82. La velocidad del flujo en los accesorios será igual a la velocidad del mismo en la tubería, por esto al sustituir los coeficientes de resistencia de cada accesorio en la ecuación 3.4 se obtiene:

$$h_r = \frac{1}{2} \times \frac{(2,36)^2}{9,81} \times ((1 \times 0,2853) + (0,82))$$

$$h_r = 0,313 \text{ m}$$

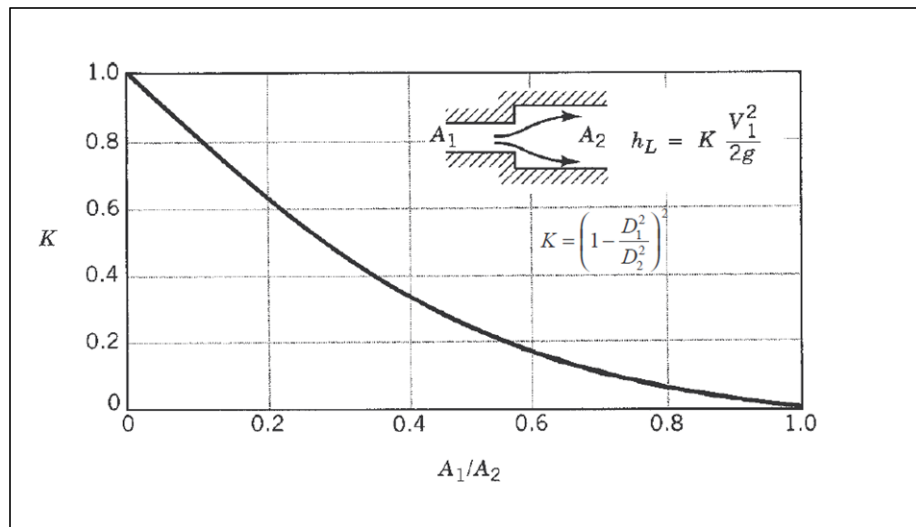


Figura 3. 2 Coeficiente de pérdida (K) para expansión brusca (Bolinaga, 1992).



3.1.2.2 Tiempo de retención en sistema de tuberías (t_r)

El tiempo de retención del flujo en el sistema de tubería viene dado principalmente por el caudal de alimentación y las dimensiones del sistema. Teniendo en cuenta que el sistema se encuentra conformado por dos tramos de tubería de diferentes longitudes y un codo de 90°, se puede calcular el tiempo de retención con la siguiente fórmula:

$$t_r = \frac{V}{Q} = \frac{(V_1 + V_2)}{Q} = \frac{\left[\left(\frac{\pi \times D^2 \times h_1}{4}\right) + \left(\frac{\pi \times D^2 \times h_2}{4}\right)\right]}{Q} \quad (\text{Ec 3.7})$$

En la ecuación anterior la letra V representa el volumen por donde pasa el flujo y Q el caudal de alimentación; para este caso se tomara a V_1 como la suma del volumen del tramo A con el B y V_2 como el volumen del codo de 90°, que según los registros presentes en los planos de la planta se sabe que dicho codo es de aproximadamente 4,16 m de longitud (h_2) y de 72 pulg de diámetro. La suma de las longitudes de ambos tramos están representados como h_1 y tendrá un valor de 22,02 m para un diámetro de 72 pulgadas que corresponde a 1,83 m en el sistema internacional. Entonces, sustituyendo en la ecuación 3.7 para un caudal de operación de 6.200 l/s se obtiene:

$$t_r = \frac{\left[\left(\frac{\pi \times (1,83 \text{ m})^2 \times (22,02 \text{ m})}{4}\right) + \left(\frac{\pi \times (1,83 \text{ m})^2 \times (4,16 \text{ m})}{4}\right)\right]}{6.200 \text{ L/s} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1.000 \text{ L}}} = 11,11 \text{ s}$$

En las tablas 4.2, A.1 y A.2 se pueden observar los tiempos de retención en el sistema de tubería, de acuerdo al número de líneas de fuentes utilizadas y los distintos caudales de alimentación de la planta.



3.1.2.3 Gradiente de mezcla en el sistema de tuberías (G_t)

Obtenida todas las pérdidas por cargas que se generan en el sistema de tuberías y el tiempo de retención en el mismo, se procede a calcular el gradiente de mezcla en esta primera etapa de la mezcla rápida. Las pérdidas totales en el sistema de tuberías son:

$$H = h_L + h_r = 0,1296 \text{ m} + 0,313 \text{ m} = 0,443 \text{ m} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Sabiendo que el agua en este sistema tiene una temperatura aproximada de 29 °C, peso específico es de 9.767 N/m^3 y viscosidad dinámica de $0,815 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$, se sustituye en la ecuación 3.1:

$$G_t = \sqrt{\frac{9.767 \text{ N/m}^3 \times 0,443 \text{ m}}{0,815 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2 \times 11,11 \text{ s}}}$$

$$G_t = 691,12 \text{ s}^{-1}$$

En las tablas 4.6 y A.3 se pueden observar los gradientes de mezcla en el sistema de tubería, de acuerdo a cada uno de los caudales de alimentación de la planta.

3.1.3 Gradiente de mezcla y tiempo de retención en tanquilla de mezcla o coagulador

La segunda mezcla rápida es solo de forma hidráulica y ocurre en una tanquilla de mezcla o también llamado coagulador; que consiste en un vertedero rectangular con baffles o tabiques de cemento ubicados a lo largo y



ancho del mismo. Es importante resaltar que este tipo de coagulador se considera que trabaja de igual forma que un floculador hidráulico de flujo horizontal. En la siguiente figura se muestra la distribución y diseño de la tanquilla de mezcla:

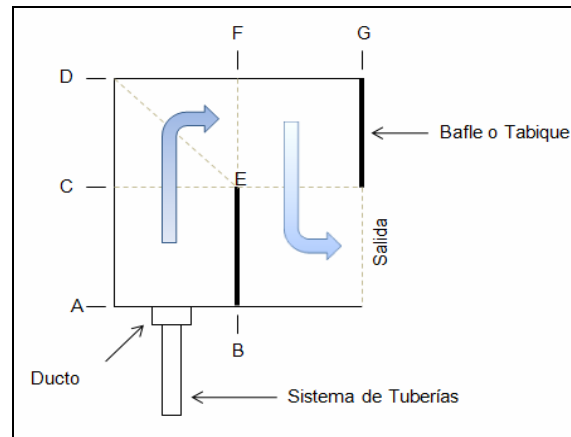


Figura 3. 3 Esquema del sistema de mezcla rápida.

3.1.3.1 Pérdidas por carga en la tanquilla de mezcla

Las pérdidas de energía ocurridas en esta etapa son debido a la fricción en el coagulador y a los tabiques ubicados en el mismo.

- **Pérdidas por fricción en la tanquilla de mezcla (h_f)**

El flujo en movimiento genera un roce o fricción en las paredes del coagulador debido a la velocidad promedio con que el mismo se transporta, esto producto del caudal de entrada. Para el cálculo de esta pérdida por carga se hace uso de la ecuación de Manning:

$$h_f = \frac{n^2 \times \bar{v}^2 \times L}{R_H^{4/3}} \quad (\text{Ec 3.9})$$



Donde:

R_H = Radio Hidráulico (m)

n = N° de Manning

\bar{v} = velocidad promedio de flujo ($\frac{m}{s}$)

L = Longitud del coagulador (m)

En los manuales técnicos de planta se exponen que para una caudal de $6500 \frac{L}{s}$ el nivel de agua en la tanquilla es alrededor de $y = 3,39$ m (Figura 3.4); trabajando con un caudal de alimentación de $6.200 \frac{L}{s}$ se asumió que dicha altura será aproximadamente igual. Sabiendo que cada coagulador tiene $7,5$ m de ancho y $7,85$ m de largo, se determina el radio hidráulico de la siguiente forma:

$$R_H = \frac{b \times y}{b + 2y} = \frac{7,5 \text{ m} \times 3,39 \text{ m}}{7,5 \text{ m} + (2 \times 3,39 \text{ m})} = 1,78 \text{ m} \quad (\text{Ec 3.10})$$

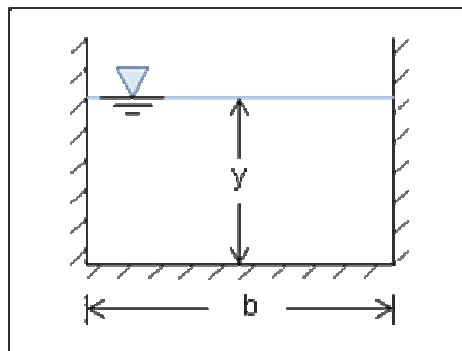


Figura 3. 4 Corte transversal de vertedero (Bolinaga, 1992).



Es necesario determinar la velocidad promedio del flujo durante su recorrido por la tanquilla, esto a partir de su área transversal y mediante el uso de la figura 3.3, que indica una serie de divisiones que facilitan dicho cálculo; acotando que $AB = CD = EB$ y tiene un valor de 3,82 m, FG de 3,98 m y DE de 5,45 m. Si se asume que la profundidad del agua es igual a 3,39 m y se trabaja para un caudal de 6.200 L/s, la velocidad promedio es igual a:

$$v_{AB} = v_{CD} = v_{EB} = \frac{6.200 \text{ L/s} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1.000 \text{ L}}}{3,82 \text{ m} \times 3,39 \text{ m}} = 0,479 \text{ m/s} \quad (\text{Ec 3.11})$$

$$v_{FG} = \frac{6.200 \text{ L/s} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1.000 \text{ L}}}{3,98 \text{ m} \times 3,39 \text{ m}} = 0,460 \text{ m/s} \quad (\text{Ec 3.12})$$

$$v_{DE} = \frac{6.200 \text{ L/s} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1.000 \text{ L}}}{5,45 \text{ m} \times 3,39 \text{ m}} = 0,336 \text{ m/s} \quad (\text{Ec 3.13})$$

$$v_T = \frac{0,479 \text{ m/s} + 0,479 \text{ m/s} + 0,479 \text{ m/s} + 0,460 \text{ m/s} + 0,336 \text{ m/s}}{5} \quad (\text{Ec 3.14})$$

$$v_T = 0,446 \text{ m/s}$$

La superficie de la tanquilla es de cemento y de acuerdo a la teoría la superficie de este material trabajan con un número de Manning de 0,013 (Bolinaga, 1992). Asumiendo que $\bar{v} = v_T$ y la longitud total del recorrido del agua como se observa en la figura 3.5 es de 27,98 m.

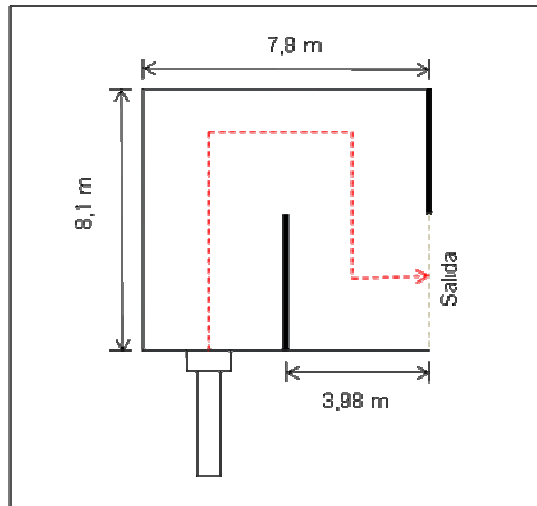


Figura 3. 5 Longitud total del recorrido del fluido en el coagulador.

Al sustituir en la ecuación 3.9 se obtiene que las pérdidas por fricción en la tanquilla de mezcla son:

$$h_f = \frac{(0,013)^2 \times (0,446 \text{ m/s})^2 \times 27,98 \text{ m}}{(1,78)^{4/3}} = 4,36 \times 10^{-4} \text{ m}$$

- **Pérdidas adicionales debido a tabiques en la tanquilla de mezcla (h_a)**

De acuerdo a los parámetros de diseño la dirección del flujo es horizontal, ya que los tabiques del coagulador no tienen orificio en la parte inferior del mismo. Por esto, los cálculos de pérdidas adicionales son realizados a partir de las ecuaciones usadas para floculadores hidráulicos de flujo horizontal. Según Arboleda (Rojas, 2000), la ecuación para determinar las pérdidas adicionales debido a tabiques es la siguiente:

$$h_a = \frac{3(N - 1)\bar{v}^2}{2g} \quad (\text{Ec 3.15})$$



Donde:

h_a = Pérdida adicional por curvas en el canal (m)

$N - 1$ = Número de tabiques

\bar{v} = velocidad promedio de flujo (m/s)

g = gravedad ($9,81 m/s^2$)

Como se puede observar en la figura 3.3, las curvas del flujo son generadas por dos tabiques. Si el flujo tiene una velocidad promedio de $0,446 m/s$:

$$h_a = \frac{3(2)(0,446 m/s)^2}{2(9,81 m/s^2)} = 0,061 m$$

3.1.3.2 Tiempo de retención en tanquilla

Al igual que el tiempo de retención en el sistema de tuberías es necesario calcular el volumen que ocupa el flujo, en este caso para un coagulador. Recordando que para $6.200 l/s$ el nivel del agua es de $3,39 m$ y las dimensiones de la tanquilla son $7,85 m$ de longitud y $7,60 m$ de ancho. El volumen del coagulador será:

$$V_c = L \times a \times h \quad (\text{Ec 3.16})$$

Donde:

V_c = volumen de coagulador (m^3)

L = Longitud del coagulador o tanquilla de mezcla (m)

a = ancho de coagulador o tanquilla de mezcla (m)



h = nivel del agua en el coagulador (m)

Al sustituir el volumen en la ecuación 3.8, se obtiene el tiempo de retención en el coagulador:

$$t_r = \frac{V}{Q} = \frac{L \times a \times h}{Q} = \frac{7,85 \text{ m} \times 7,60 \text{ m} \times 3,39 \text{ m}}{6.200 \text{ L/s} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1.000 \text{ L}}} = 32,62 \text{ s} \quad (\text{Ec 3.17})$$

En la tabla 4.3, A.1 y A.2 del anexo A también se muestran los tiempos de retención en la tanquilla de mezcla, a los diferentes caudales de alimentación a tratar en planta.

3.1.3.3 Gradiente de mezcla en tanquilla (G_c)

Ya obtenido todas las pérdidas por cargas que se generan en la tanquilla de mezcla o coagulador y el tiempo de retención en el mismo, se procede a calcular el gradiente de mezcla en esta segunda etapa de la mezcla rápida. Las pérdidas totales en el coagulador son:

$$H = h_f + h_a = 4,36 \times 10^{-4} \text{ m} + 0,061 \text{ m} = 0,061 \text{ m}$$

La temperatura aproximada del agua es 26 °C, peso específico es de 9.775 N/m^3 y viscosidad dinámica de $0,890 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$, se sustituye en la ecuación 3.1:

$$G_c = \sqrt{\frac{9.775 \text{ N/m}^3 \times 0,061 \text{ m}}{0,870 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2 \times 32,62 \text{ s}}}$$



$$G_c = 144,95 \text{ s}^{-1}$$

En las tablas 4.7 y A.3 del anexo A se pueden observar los gradientes de mezcla en el coagulador, a los diferentes caudales de alimentación de la planta.

3.1.4 Gradiente de mezcla hidráulico y tiempo de retención en floculador

En el proceso de floculación es necesaria una mezcla lenta suministrada de forma hidráulica o de forma mecánica. La planta La Guairita trabaja con ambas modalidades, las dos son de gran importancia en el proceso de floculación. Inicialmente se trabaja con los cálculos necesarios para determinar el gradiente hidráulico en la etapa de floculación.

La agitación del agua, mediante mezcla hidráulica produce gradientes de mezcla cuya intensidad controla el grado de floculación producido. El número de colisiones entre partículas está directamente relacionado con el gradiente de mezcla o velocidad. Se puede determinar la potencia inducida al agua, necesaria para obtener un grado particular de floculación, según un gradiente de velocidad específico.

La planta La Guairita trabaja con 6 unidades de floculación, subdivididas por 6 etapas cada una. Los floculadores son de flujo vertical y consisten en un tanque de concreto dividido por tabiques, baffles o pantallas de madera, dispuesto de tal forma que el agua fluya hacia arriba y hacia abajo, por encima y por debajo de los tabiques o pantallas que dividen el tanque (Figura 3.6).

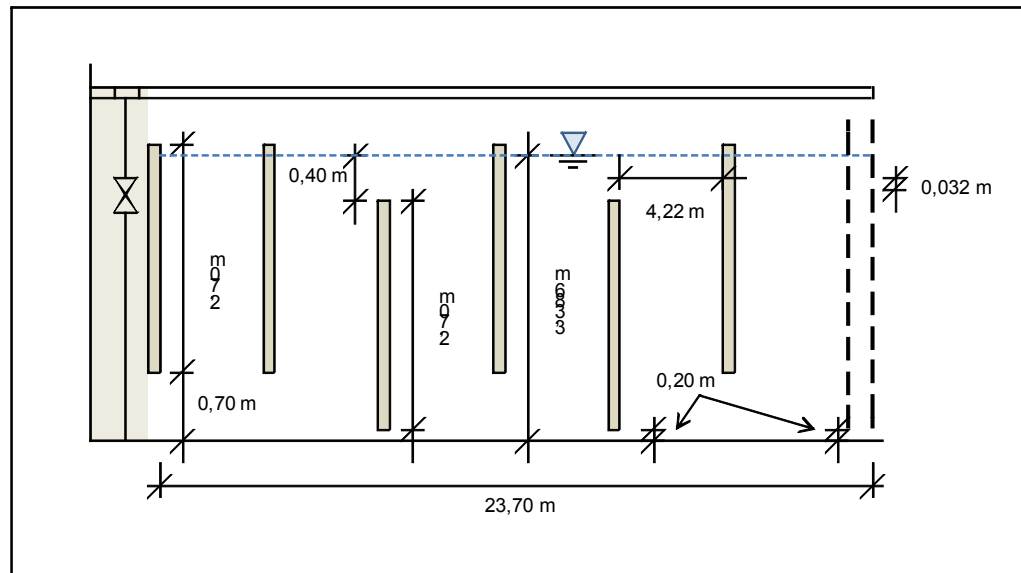


Figura 3. 6 Ubicación de pantallas en floculadores de la planta La Guairita.

3.1.4.1 Pérdidas por carga en la floculador

Para la determinar el gradiente de mezcla en esta etapa, es necesario calcular las pérdidas por carga generadas en la floculación al igual que en la mezcla lenta; en este caso las pérdidas por carga involucradas son: pérdidas por fricción debido a los accesorios, pérdidas por fricción en la superficie del floculador y pérdidas adicionales por curvas en el canal.

- **Pérdidas por fricción debido a los accesorios (hr)**

A la entrada de cada floculador se encuentran 25 válvulas mariposa de 12 pulgadas de diámetro cada una, que transportan el agua de la mezcla lenta hacia la mezcla rápida. Para determinar estas pérdidas por fricción es necesario primero calcular la velocidad del flujo en las válvulas; si para un caudal de alimentación de 6.200 $(L/s) = 6,2 \text{ m}^3/s$ estarán en uso 5



floculadores y asumiendo que el área de la válvula es igual a la de una tubería de 12 pulgadas de diámetro, la velocidad del flujo por cada válvula será:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{\left(\frac{Q}{5}\right)}{\left(\frac{\pi \times D^2}{4}\right)} \quad (\text{Ec 3.18})$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{\left(\frac{6,2 \text{ m}^3/\text{s}}{5}\right)}{\left(\frac{\pi \times \left(12 \text{ pulg} \times \frac{0,3048 \text{ m}}{12 \text{ pulg}}\right)^2}{4}\right)} = 0,68 \text{ m/s}$$

Según la figura A.1 el factor de fricción (f) para una tubería de acero comercial con un diámetro de 12 pulgadas es de 0,0132 y el coeficiente de resistencia para válvulas mariposas de diámetros entre 10 y 14 pulgadas es $K = (35 \times f)$; entonces el coeficiente de resistencia para las 25 válvulas es:

$$\sum_{i=1}^n e_i = 25 \times K = 25 (35 \times 0,0132) = 11,55 \quad (\text{Ec 3.19})$$

Luego al sustituir en la ecuación 3.5 se obtiene que las pérdidas por fricción debido a los accesorios son:

$$h_r = \frac{1}{2} \times \frac{(0,68 \text{ m/s})^2}{9,81 \frac{\text{Kgm}}{\text{Kgf}} \times \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \times (11,55) = 0,272 \text{ m}$$



- **Pérdidas por fricción en el floculador (h_f)**

Al igual que en la tanquilla de mezcla el flujo en movimiento genera un roce o fricción en las paredes del floculador debido a la velocidad media con que el mismo se transporta, esto producto del caudal de entrada. Para el cálculo de el radio hidráulico hay que tener en cuenta que el nivel del agua en el coagulador (y) será igual a los 3,39 m según el caudal de entrada de 6.200 (L/s) menos las pérdidas por fricción debido a los accesorios ($h_r = 0,272$ m), para un floculador de 23,14 m de ancho (b) y 23,70 m de largo (Figura 3.4); se determina el radio hidráulico a partir de la ecuación 3.10:

$$R_H = \frac{b \times y}{b + 2y} = \frac{23,14 \text{ m} \times (3,39 - 0,272) \text{ m}}{23,14 \text{ m} + (2 \times (3,39 - 0,272) \text{ m})} = 2,45 \text{ m}$$

Luego es necesario determinar la velocidad del flujo durante su recorrido por el floculador, recordando que para estos cálculos se tomo en consideración 5 floculadores en uso para un caudal de 6.200 (L/s). La misma se determina mediante la siguiente ecuación:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{\left(\frac{6.200 \text{ L/s} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1.000 \text{ l}} \right)}{5 \times b \times 2y} = \frac{1,24 \text{ m}^3/\text{s}}{23,14 \text{ m} (3,39 - 0,272) \text{ m}} \quad (\text{Ec 3.20})$$

$$v = 0,0158 \text{ m/s}$$

Las pérdidas por fricción en el floculador se calculan a partir de la ecuación de Manning (Ecuación 3.9), recordando que el número de Manning



para superficie de cemento es de 0,013 y la longitud total recorrida por el agua en el floculador es de 45,636 m (Figura 3.7).

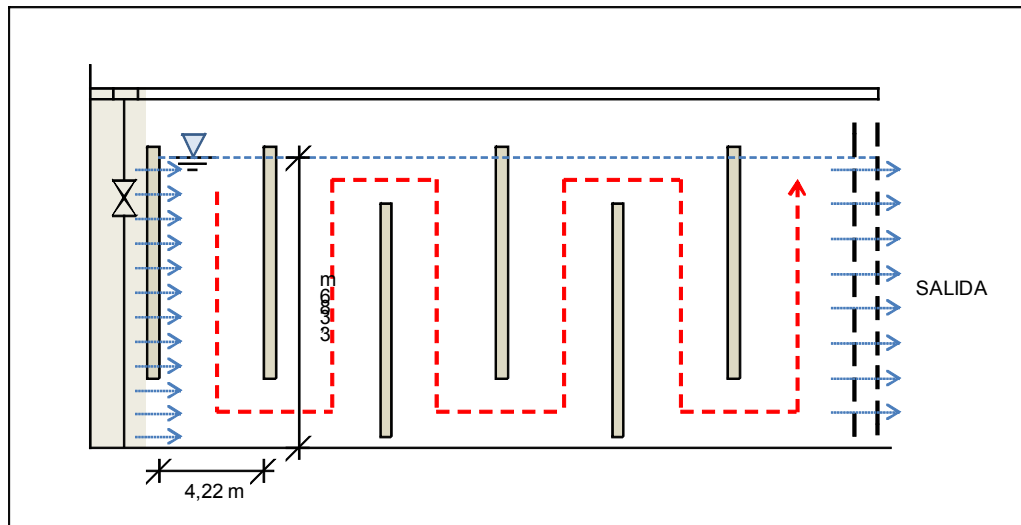


Figura 3. 7 Longitud total del recorrido del fluido en el floculador.

Las pérdidas por fricción en el floculador son:

$$h_f = \frac{(0,013)^2 \times (0,0158 \text{ m})^2 \times 45,636 \text{ m}}{(2,45 \text{ m})^{4/3}} = 5,837 \times 10^{-7} \text{ m}$$

- **Pérdidas adicionales debido a tabiques en el floculador (h_c)**

El floculador es de flujo vertical y sus pérdidas adicionales por curvas en el canal se deben a la velocidad del flujo entre los baffles o tabiques y la velocidad del flujo en la abertura de los mismos. En la figura 3.8 se observa el movimiento que tiene el fluido dentro del floculador, resaltando que la



velocidad para el orificio pequeño (v_4) será despreciada y la velocidad en los orificios grandes (v_2) será la relevante dentro de este proceso.

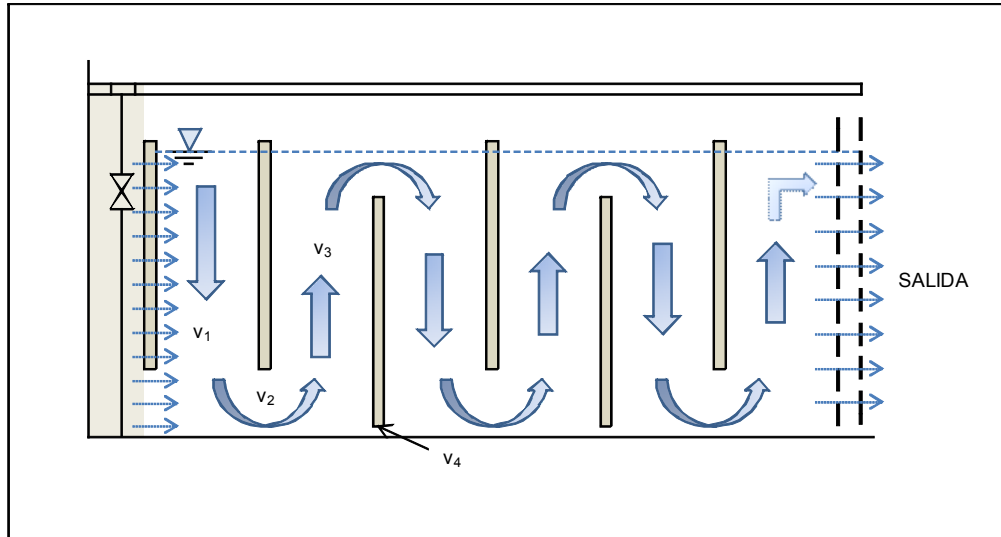


Figura 3. 8 Desviación del fluido de acuerdo a los tabiques en el floculador.

Entonces, un caudal de alimentación de 6.200 (L/s) trabaja con 5 floculadores que mantienen una distancia entre tabiques igual a $4,22 \text{ m}$ (Figura 3.7) y para $2,14 \text{ m}$ de ancho del floculador, se calcula la velocidad entre tabiques (v_1):

$$v_1 = \frac{Q}{A} = \frac{6.200 \text{ L/s} \times \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1.000 \text{ L}} \right)}{5} = \frac{6.200 \text{ m}^3/\text{s}}{4,22 \text{ m} \times 23,14 \text{ m}} = 0,0127 \text{ m/s}$$

Y sabiendo que el orificio grande del tabique o bafle tiene $0,70 \text{ m}$ de largo y $4,37 \text{ m}$ ancho, la velocidad en el orificio grande (v_2) es:



$$v_2 = \frac{Q}{A} = \frac{6.200 \text{ L/s} \times \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1.000 \text{ L}}\right)}{0,70 \text{ m} \times 4,37 \text{ m}} = 0,405 \text{ m/s}$$

Según (Rojas, 2000) la ecuación para determinar las pérdidas adicionales por curvas (h_c) es la siguiente:

$$h_c = \frac{N \times v_1^2 + (N - 1)v_2^2}{2g} \quad (\text{Ec 3.21})$$

Donde:

h_c = Pérdida adicional por curvas en el canal (m)

$N - 1$ = Número de tabiques

v_1 = velocidad de flujo entre baffles (m/s)

v_2 = velocidad de flujo en el orificio de los baffles (m/s)

g = gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$)

Si en el floculador se presentan 6 tabiques, las pérdidas adicionales por curvas serán:

$$h_c = \frac{7 \times (0,0127 \text{ m/s})^2 + (6)(0,405 \text{ m/s})^2}{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2} = 0,0503 \text{ m}$$

3.1.4.2 Tiempo de retención en el floculador

Para 5 floculadores en funcionamiento a un caudal de entrada de 6.200 (L/s) y se obtiene un nivel de agua en cada uno de $3,386 \text{ m}$; teniendo



en cuenta que cada floculador tiene 23,70 m de longitud y 23,14 m de ancho se puede determinar su tiempo de retención a partir de la ecuación 3.18:

$$t_r = \frac{V}{Q} = \frac{L \times a \times h}{Q} = \frac{23,70 \text{ m} \times 23,14 \text{ m} \times 3,386 \text{ m}}{\left(\frac{6.200 \text{ L/s} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1.000 \text{ L}}}{5} \right)} = 1.497,53 \text{ s}$$

$$t_r = 1.497,53 \text{ s} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 24,96 \text{ min} = 24' 58''$$

En las tablas 4.4, A.1 y A.2 del anexo A se tienen los tiempos de retención en el floculador, a los diferentes caudales de alimentación que se manejan en planta para 5 y 6 floculadores en funcionamiento.

3.1.4.3 Gradiente de mezcla en floculador (G_f)

Ya obtenidas todas las pérdidas por cargas que se generan en el floculador y el tiempo de retención en el mismo, se procede a calcular el gradiente de mezcla.

Las pérdidas totales en el floculador son:

$$H = h_r + h_c + h_f = 0,272 \text{ m} + 5,837 \times 10^{-7} \text{ m} + 0,0503 \text{ m} = 0,322 \text{ m}$$

Sabiendo que el agua en este sistema tiene una temperatura aproximada de 26 °C, peso específico es de 9.775 N/m^3 y viscosidad dinámica de $0,890 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$, se sustituye en la ecuación 3.1:



$$G_f = \sqrt{\frac{9.775 \text{ N/m}^3 \times 0,322 \text{ m}}{0,870 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2 \times 1.497,53 \text{ s}}}$$

$$G_f = 49,18 \text{ s}^{-1}$$

En las tablas 4.8, A.3 y A.4 del anexo A se muestran los gradientes de mezcla en el floculador, a los diferentes caudales de alimentación que se manejan en planta para 5 y 6 floculadores en funcionamiento.

3.1.5 Tiempo de retención en el sedimentador

La planta “La Guairita” trabaja con 6 unidades de sedimentación las mismas están ubicadas después de la floculación; cada sedimentador contiene un puente barrelado que transporta por medio de paletas el lodo sedimentado en el proceso hacia el drenaje del mismo. Para la determinación del tiempo de retención es necesario definir el volumen completo que contiene el vertedero del sedimentador; se hace uso de la figura 3.9 donde se presentan sus dimensiones reales.

A continuación se realiza la determinación del área superficial y transversal de fondo del sedimentador sabiendo que el mismo contiene las siguientes dimensiones:

L = largo del sedimentador = 91,32 m

a = ancho del sedimentador = 24,54 m

EF = 6,135 m

CD = 0,26 m

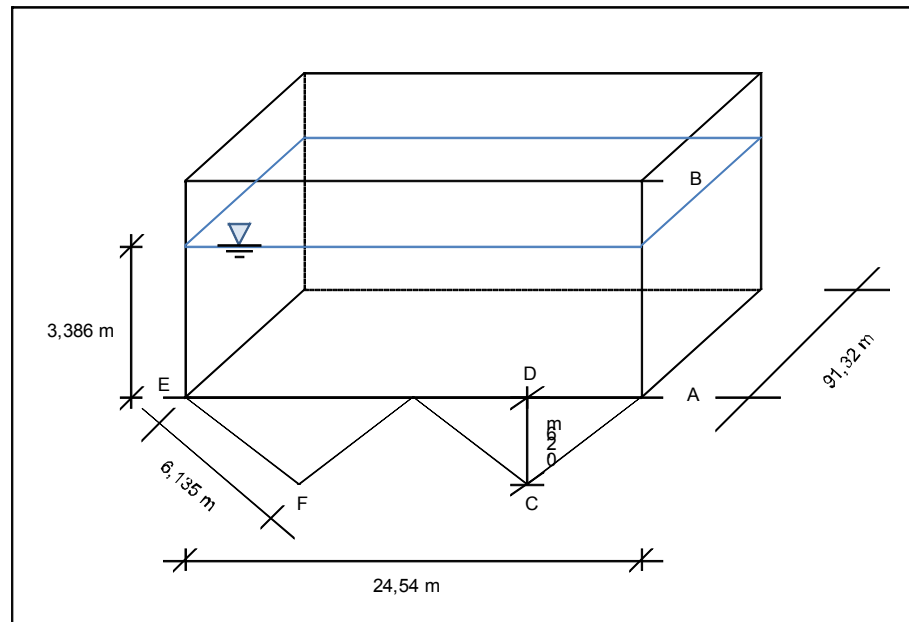


Figura 3. 9 Corte transversal del sedimentador.

- Área superficial (A_s)

$$A_s = L \times a = 91,32 \text{ m} \times 24,54 \text{ m} = 2.240,99 \text{ m}^2 \quad (\text{Ec. 3.22})$$

- Área transversal de fondo (A_T)

$$A_T = \left(\frac{EF \times CD}{2} \right) \times 4 = \left(\frac{6,135 \text{ m} \times 0,26 \text{ m}}{2} \right) \times 4 = 3,19 \text{ m}^2 \quad (\text{Ec. 3.23})$$

Se desprecian todas las pérdidas por carga que se puedan presentar a la entrada del sedimentador, el nivel del agua en el mismo para un caudal de



6.200 (L/s) es de 3,386 m, el volumen que ocupa el fluido en AB a lo largo de todo el sedimentador es:

$$V_{AB} = A_s \times 3,386 \text{ m} = 2240,99 \text{ m}^2 \times 3,386 \text{ m} = 7.588 \text{ m}^3 \quad (\text{Ec. 3.24})$$

El volumen que ocupa el fluido en AC es:

$$V_{AC} = A_T \times L = 3,19 \text{ m}^2 \times 91,32 \text{ m} = 291,32 \text{ m}^3 \quad (\text{Ec. 3.25})$$

Entonces el volumen total del sedimentador es:

$$\begin{aligned} V_T &= V_{AB} + V_{AC} = 7.588 \text{ m}^3 + 291,32 \text{ m}^3 \\ &= 7.879,33 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (\text{Ec. 3.26})$$

Para 5 sedimentadores en funcionamiento a un caudal de entrada de 6.200 (L/s); se puede determinar su tiempo de retención a partir de la ecuación 3.17:

$$t_r = \frac{V}{Q} = \frac{V_T}{Q} = \frac{7.879,33 \text{ m}^3}{\left(\frac{6.200 \text{ L/s} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1.000 \text{ L}}}{5} \right)} = 6.354,29 \text{ s}$$

$$t_r = 6.354,29 \text{ s} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 105,90 \text{ min} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 1,77 \text{ h}$$



Al igual que en las otras etapas en las tablas 4.5, A.1 y A.2 del anexo A se muestran los tiempos de retención en el sedimentador, a los diferentes caudales de alimentación que se manejan en planta para 5 y 6 sedimentadores en funcionamiento.

3.2 Determinación del tiempo de sedimentación experimental

3.2.1 Diferencias entre el tiempo de retención en sedimentadores y tiempo de sedimentación

Se define por sedimentación a la operación por la cual se remueven las partículas sólidas de una suspensión mediante la fuerza de gravedad. El tipo de sedimentación utilizada en la planta “La Guairita” es una sedimentación después de la coagulación y floculación o ablandamiento que se utiliza para remover los sólidos suspendidos sedimentables, material orgánico o biomasa preformada que han sido productos por el tratamiento químico, como en el caso de la remoción de color y turbiedad.

Como se sabe, los sedimentadores son vertederos rectangulares que tienen como función principal la eliminación de los sólidos suspendidos que se forman en la floculación. La mayoría de las veces se llegan a confundir los términos de tiempo de retención en el sedimentador con el tiempo de sedimentación, ambos términos están relacionados entre sí pero son diferentes.

El termino tiempo de retención consiste en el tiempo en que perdura o es retenida el agua floculada dentro de estos sedimentadores y que a su vez esta ha sedimentado la mayoría de los flóculos y sólidos sedimentables antes de llegar a la etapa de filtración; este varía de acuerdo al caudal de alimentación y a las dimensiones del vertedero o sedimentador de planta. A diferencia del tiempo de sedimentación que indica el tiempo en que la mayor



cantidad de sólidos suspendidos ha sedimentado o decantado y se refleja fácilmente en las pruebas de jarras.

La prueba de jarras es el método que simula al proceso de potabilización a escala de laboratorio, este contiene una etapa de mezcla rápida, mezcla lenta y sedimentación, donde esta última es la menos parecida al proceso de potabilización original por no trabajar a la misma velocidad de sedimentación o asentamiento que se presenta en planta por efectos del caudal de alimentación y profundidad.

Por efectos de diseño, se pueden obtener tiempos de retención cercanos a las dos (2) horas a diferencia de las pruebas de jarras en donde no sería efectivo dejar sedimentar los flóculos durante tanto tiempo, ya que la jarra tiene dimensiones muy diferentes a las de un sedimentador real y solo se trabaja con dos (2) litros de agua cruda como muestra de trabajo.

Estas diferencias ya son un problema a la hora de ajustar las mismas situaciones que se presentan en planta a la prueba de jarra para así determinar con mayor exactitud cuál es la dosis mejorada que le conviene al proceso. Por esto se desea saber cuál es el tiempo de sedimentación más favorable para la investigación, luego de saber que se puede ajustar un tiempo de retención real a la prueba porque el mismo no trabaja a las mismas velocidades de asentamiento ni al mismo caudal de entrada.

3.2.2 Cálculo de gradientes de mezcla mecánicos en floculación

En esta etapa de la investigación, en las pruebas de jarra se hace uso de los gradientes hidráulicos y mecánicos correspondientes a la mezcla rápida y lenta en conjunto con los tiempos de retención en cada una de ellas, sabiendo que el proceso de floculación trabaja con el gradiente hidráulico y mecánico a la vez para simular el proceso de potabilización de la planta.



Los floculadores mecánicos agregan potencia al agua para asegurar una mezcla lenta mediante agitadores mecánicos de paletas de eje horizontal, las cuales imparten un movimiento rotatorio al agua así como cierta turbulencia interna con ayuda de un motorreductor que ajusta manualmente la velocidad del motor.

Para la determinación de este gradiente mecánico se hizo una evaluación de cada uno de los floculadores para percibir si funcionaban en perfecto estado. Cada floculador se subdivide en dos (2) etapas; cada una por 3 ejes que contienen 5 pares de paletas, ubicados de forma horizontal y ajustados a un motorreductor que regula su velocidad. A cada motorreductor se le ajusto la velocidad mínima y máxima que podía alcanzar, adquiriendo un rango de gradiente de velocidad de gran utilidad a la hora de la investigación.

Para el cálculo del gradiente primero se determinó la velocidad angular máxima y mínima en el motor y en el eje. En la tabla siguiente se observan los periodos de tiempo (T) máximos y mínimos que pueden manejar el motor y el eje y su equivalencia en velocidad angular (ω):

Tabla 3. 1 Periodos de tiempo y velocidades angulares de las paletas del floculador

Equipo	T min (s)	T máx. (s)	ω min (rpm)	ω máx. (rpm)
Motor	30,059	5	2	12
Eje	124,015	20,02	0,4803	3



Para determinar el gradiente de velocidad de los floculadores mecánicos solo se hace uso de las revoluciones por minuto correspondientes al eje; para transformar dichos rpm a m/s se utiliza la siguiente fórmula:

$$N = \frac{v^* \times 60}{2 \times \pi \times r} \quad (\text{Ec 3.27})$$

Donde:

N = revoluciones por minuto (rpm)

r = radio desde el eje a las paletas (m)

v^* = velocidad de las paletas (m/s)

Despejando v^* se obtiene;

$$v^* = \frac{N \times 2\pi \times r}{60} \quad (\text{Ec 3.28})$$

La distancia del eje a las paletas es de 1,51 m como se muestra en la figura 3.10 y se trabaja con un mínimo movimiento de las paletas de 0,4803 rpm y el máximo de 3 rpm.

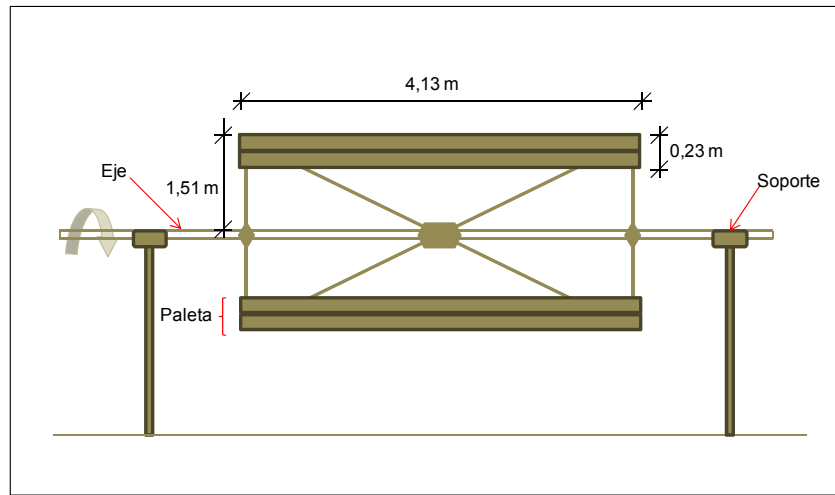


Figura 3. 10 Sistema de paletas de floculador mecánico.

La velocidad de las paletas según la ecuación 3.28 será de:

$$v_{\min}^* = \frac{0,4803 \text{ rpm} \times 2\pi \times 1,51 \text{ m}}{60} = 0,0759 \text{ m/s}$$

$$v_{\max}^* = \frac{3 \text{ rpm} \times 2\pi \times 1,51 \text{ m}}{60} = 0,474 \text{ m/s}$$

La velocidad relativa de las paletas con respecto al fluido se obtiene de la siguiente forma:

$$v = 0,75 v_p \quad (\text{Ec 3.29})$$



Donde:

v = velocidad relativa de las paletas con respecto al fluido (m/s)

v_p = velocidad de las paletas (m/s)

Sustituyendo v_{min}^* y v_{max}^* en la ecuación (3.23) se obtiene:

$$v_{min} = 0,75 \times 0,0759 \text{ m/s} = 0,057 \text{ m/s}$$

$$v_{max} = 0,75 \times 0,474 \text{ m/s} = 0,356 \text{ m/s}$$

Si v_{min} y v_{max} representan a la velocidad relativa mínima y máxima de las paletas con respecto al fluido, el gradiente de velocidad en los floculadores mecánicos será:

$$G_m = \sqrt{\frac{C_D \times \rho \times A_p \times v^3}{2 \times \mu \times V}} \quad (\text{Ec 3.30})$$

Donde:

C_D = Coeficiente de arrastre de las paletas

A_p = área transversal de paletas (m)

v = velocidad relativa de las paletas con respecto al fluido (m/s)

V = Volumen de floculador (m^3)

ρ = densidad del agua (Kg/m^3)

μ = Viscosidad dinámica del agua ($Kgm/m \times s$)



Se observan las figuras 3.10 y 3.11, y las paletas tienen 4,13 m de longitud (L) y 0,23 m de ancho (a); cada eje sujeta cinco (5) pares de paletas. Con esta información se pueden determinar el área transversal de las mismas (A_p):

$$A_p = L \times a \times \text{N}^\circ \text{ pares} / \text{ejes} \times \text{N}^\circ \text{ paletas} \quad (\text{Ec 3.31})$$

$$A_p = 4,13 \text{ m} \times 0,23 \text{ m} \times 5 \times 2 = 9,49 \text{ m}^2$$



Figura 3. 11 Ubicación de pares de paletas en el eje.

Según Rouse, para secciones rectangulares que se desplazan en el agua, el valor de C_D puede estimarse a partir de la tabla 3.2; de acuerdo a la relación entre longitud y ancho de paleta.



Tabla 3. 2 Valores de coeficiente de arrastre (C_D) en secciones rectangulares (Arboleda, 1992)

Relación largo ancho de la paleta (L/a)	Coficiente de Arrastre (C_D)
1	1,16
5	1,2
20	1,5
∞	1,95

Se determina el coeficiente de arrastre de las paletas (C_D), donde:

$$\frac{L}{a} = \frac{4,13 \text{ m}}{0,23 \text{ m}} = 17,96 \cong 18$$

Se interpola entre valores de L/a iguales a 5 y 20, se asume que el coeficiente de arrastre corresponde a 1,46. Recordando que el floculador tiene 23,70 m de largo (L), 23,14 m de ancho (a) y un nivel de agua de 3,386 m; el volumen del mismo es:

$$V = L \times a \times h = 23,70 \text{ m} \times 23,14 \text{ m} \times 3,386 \text{ m} = 1.856,94 \text{ m}^3 \quad (\text{Ec. 3.32})$$

Si el agua dentro del floculador se mantiene a una temperatura de 26 °C, densidad de 996,787 Kg/m^3 y viscosidad dinámica de



$0,870 \times 10^{-3} \text{ Kg}^m/\text{m} \times \text{s}$; se sustituye en la ecuación (3.30) y se obtiene que

el gradiente máximo y mínimo del floculador mecánico son:

- Gradiente mínimo con $v_{\min} = 0,057 \text{ m/s}$

$$G_{\min} = \sqrt{\frac{1,46 \times 996,787 \text{ Kg}/\text{m}^3 \times 9,49 \text{ m}^2 \times (0,057 \text{ m/s})^3}{2 \times 0,870 \times 10^{-3} \text{ Kg}^m/\text{m} \times \text{s} \times 1,856,94 \text{ m}^2}} = 0,89 \text{ s}^{-1}$$

- Gradiente máximo con $v_{\max} = 0,356 \text{ m/s}$

$$G_{\max} = \sqrt{\frac{1,46 \times 996,787 \text{ Kg}/\text{m}^3 \times 9,49 \text{ m}^2 \times (0,356 \text{ m/s})^3}{2 \times 0,870 \times 10^{-3} \text{ Kg}^m/\text{m} \times \text{s} \times 1,856,94 \text{ m}^2}} = 13,88 \text{ s}^{-1}$$

La agitación mecánica extra que se le proporciona al proceso de floculación solo puede estar dentro de este rango de 0,89 a 13,88 s^{-1} . Es decir el gradiente de mezcla total en la floculación será la suma del gradiente hidráulico de acuerdo al caudal de alimentación más el gradiente de mezcla mecánico que se encuentre dentro de este rango ya fijado.

Para la determinación del tiempo de sedimentación en pruebas de jarra, se ajustó en la etapa de floculación el mínimo gradiente permitido por los motorreductores en planta (0,89 s^{-1}) más el gradiente hidráulico correspondiente para cada caudal ya calculado en la sección 3.1.4.3. Los resultados de la combinación del gradiente hidráulico según los caudales de entrada a la planta más gradientes mecánicos ajustados en la misma, se presentan en la tabla B.1 del anexo B para la determinación del tiempo de sedimentación.



3.2.2.1 Determinación de agitación de la mezcla rápida y lenta en prueba de jarras

En la sección 3.1 y 3.2.2 se determinaron cada uno de los gradientes hidráulicos y mecánicos que se utilizan en planta de acuerdo al caudal de alimentación y al rango disponible en los motorreductores. Este gradiente para ser utilizarlo en las pruebas de jarras debe ser relacionado en un ábaco para convertir los s^{-1} a revoluciones por minuto (rpm), utilizando como referencia fluidos a la temperatura de 23 °C. Para ello se hace uso de la figura 3.12 y los resultados de rpm obtenidos de los gradientes mecánicos e hidráulicos para cada caudal utilizado en la investigación, se presentan en la tabla B.2 del anexo B.

3.2.3 Definición del mejor tiempo de sedimentación en las pruebas de jarras

Se realizaron diferentes pruebas de jarras fijando la dosis mejorada de coagulante y cloro usada en planta de acuerdo a la calidad del agua cruda que ingresaba a la misma, posteriormente se ajustaron los gradientes de mezcla y tiempos de retención calculados para las etapas de coagulación y floculación en la sección 3.1 y 3.2.2.

En cada prueba de jarra se tomaron muestras a diferentes tiempos de sedimentación, que varían entre los 15 y 40 minutos. Cada muestra fue tomada en diferentes jarras a medida que transcurría el tiempo, analizándose distintos parámetros de calidad como: la turbiedad, color, pH, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos y aluminio residual de acuerdo a los procedimientos descritos en la sección 2.2.1.

Estos análisis se realizaron con el fin de conocer cuál era la tendencia que se reflejaba en la calidad del agua sedimentada a medida que transcurría el tiempo y así obtener al final el tiempo de sedimentación más



óptimo y con resultados de calidad parecidos a los presentados en el agua sedimentada en planta. Los resultados de todos los análisis efectuados en esta etapa se encuentran en el anexo B desde la tabla B.3 hasta B.11.

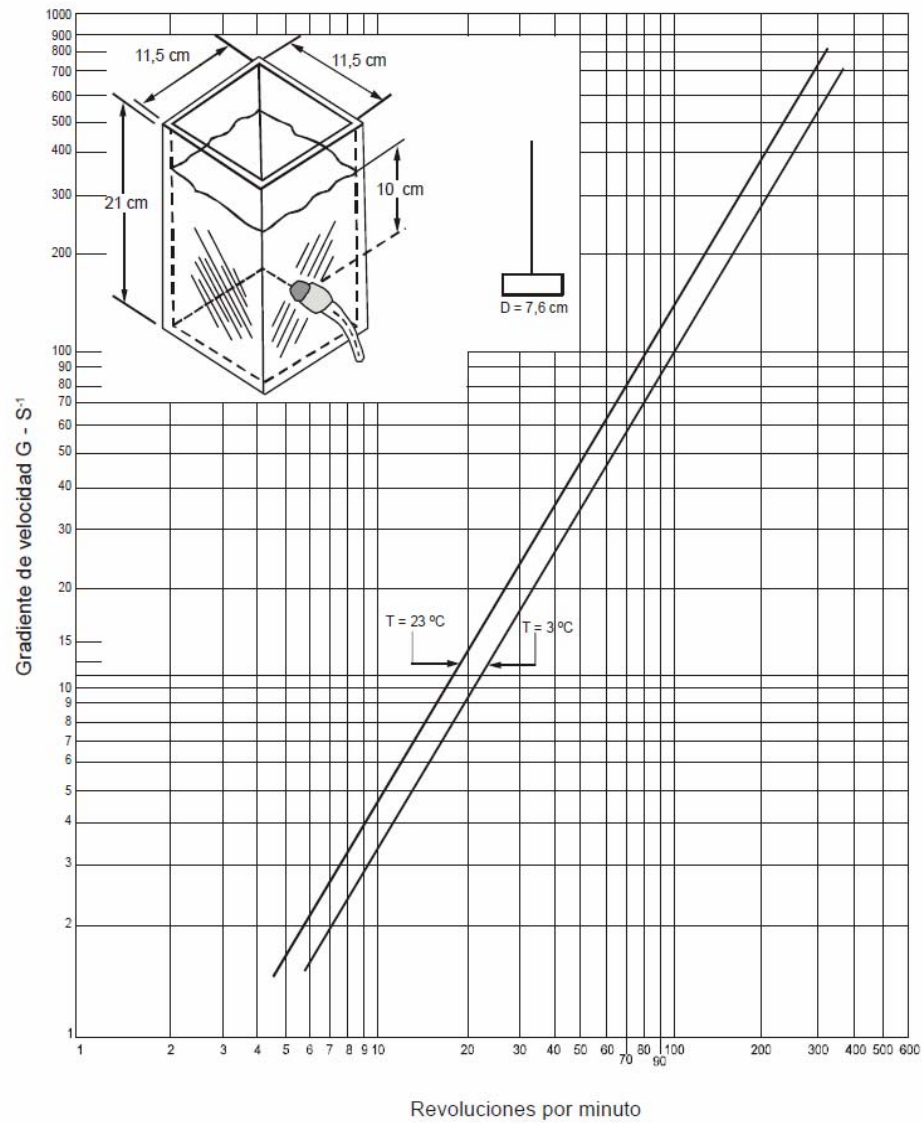


Figura 3. 12 Ábaco que relaciona el gradiente de velocidad con las revoluciones por minuto de un equipo de prueba de jarras con recipientes de 2 litros de sección cuadrada (Vargas, 2004).



3.3 Cálculo de la dosis mejorada a través de pruebas de jarras

3.3.1 Simulación de proceso de potabilización a escala de laboratorio

Las aguas naturales contienen sustancias tanto disueltas como en suspensión, ambas pueden ser orgánicas e inorgánicas. Las materias en suspensión pueden tener un tamaño y densidad tal que pueden eliminarse del agua por simple sedimentación, pero algunas partículas son de un tamaño tan pequeño y tienen una carga eléctrica superficial que las hace repelerse continuamente, impidiendo sus aglomeración y formación de una partícula más pesada y poder así sedimentar. La coagulación y floculación son dos procesos dentro de la etapa de clarificación del agua donde las partículas se pueden aglutinan en pequeñas masas llamadas flóculos tal que su peso específico supere a el del agua y puedan precipitar.

La coagulación se refiere al proceso de desestabilización de las partículas suspendidas de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas y la floculación tiene relación con los fenómenos de transporte dentro del líquido para que las partículas hagan contacto. En esta etapa de la investigación el punto principal es la realización de ensayos de pruebas de jarras con muestras de agua cruda a diferentes calidades y ajuste de gradientes de mezclado en la unidades de mezcla rápida y mezcla lenta que logre la desestabilización y aglutinamiento eficiente de las partículas o materia en suspensión mediante la aplicación de la dosis correcta de coagulante.

Las pruebas de jarra consisten en simular en laboratorio el proceso de coagulación-floculación de la planta y evaluar durante su realización los parámetros de mayor incidencia, con el fin de controlar los procesos mencionados y seleccionar la dosis mejorada de coagulantes y de los otros productos químicos que se dosifican en planta. Este ensayo es realizado en



un equipo comercial de velocidad variable fabricado por la Phipps & Bird con jarras de sección cuadrada de plástico de dos (2) litros de capacidad, paleta o rotor de latón de 7,6 cm de diámetro y sin deflectores para el cual se ha desarrollado el ábaco que relaciona el gradiente de mezcla con la velocidad de rotación de las paletas (Figura 3.12).

3.3.1.1 Procedimiento para realizar pruebas de jarras

A continuación se presenta el procedimiento realizado en las pruebas de jarra para esta etapa de la investigación:

1. Determinar turbiedad, color, pH, alcalinidad y conductividad a una muestra de agua cruda a usar para las pruebas.
2. Tomar muestras de 2 litros de agua cruda en cada jarra y se enciende las luces del equipo.
3. Ajustar en el equipo los rpm y tiempo de retención correspondientes a la mezcla rápida (sistema de tuberías y tanquilla de mezcla) según el caudal a usar.
4. Ajustar en el equipo la suma de rpm hidráulico y rpm mecánico correspondiente a la mezcla lenta con su respectivo tiempo de retención de acuerdo al caudal a usar.
5. Ajustar en la última etapa del equipo a cero (0) rpm y 30 minutos de tiempo retención para simular la etapa de sedimentación.
6. Acoplar la jarra con las paletas para que al iniciar el ensayo no exista errores.
7. Llenar varias jeringas con las distintas dosis de coagulante en mililitros a agregar en cada jarra.
8. Cargar diferentes jeringas con una dosis fija de cloro para dosificar en cada jarra.



9. Encender el equipo y verificar si todas las paletas se mueven a la misma velocidad, si no ocurre ajustar de nuevo las paletas y verificar.
10. Dosificar cada jarra con la ayuda de una (1) u dos (2) personas, distribuyendo tres (3) o dos (2) jarras por persona y agregando la dosis cerca del ubicación de las paletas.
11. Esperar que la programación del ensayo termine y suene la última alarma que indica la finalización de la etapa de sedimentación.
12. Tomar muestras de 80 mililitros (ml) aproximadamente de cada una de las jarras.
13. Medir turbiedad, color y pH a cada una de las muestras tomadas luego del ensayo.

3.3.1.2 Determinación de la dosis mejorada

Luego de realizar el ensayo de prueba de jarras la determinación de la dosis mejorada se realiza a partir de la evaluación de los parámetros de calidad de las muestras finales; la jarra que obtenga valores cercanos o dentro de las normas de potabilización utilizadas en la planta será la que determinara la dosis mejorada de coagulante. No siempre la jarra que mantenga los menores valores de turbiedad y color serán los más recomendables a selección para una dosis mejorada sino la jarra con mejores parámetros de calidad y menor uso de ppm en la dosificación. Todas estas pruebas fueron realizadas para diferentes calidades de agua cruda y a distintos caudales de alimentación que establecían los rpm a usar en dicho ensayo.

Para la etapa de floculación mecánica fueron fijados gradientes de 0 s^{-1} (motor de paletas apagado), 2 s^{-1} y 4 s^{-1} donde se pudo percibir la influencia del gradiente mecánico en la determinación de la dosis mejorada de coagulante, teniendo en cuenta que estos gradientes fueron tomados de acuerdo a las condiciones en que se trabajaba en planta en ese momento.



Los resultados de estas pruebas se encuentran ubicados en el anexo C, desde la tabla C.2 hasta C.11 y desde la tabla C. 13 a la C.24.

3.4 Influencia de la variación del gradiente mecánico

3.4.1 Variación del gradiente mecánico en planta

En esta etapa de la investigación se trabaja simultáneamente las pruebas de jarra con

el proceso en planta. Para ello se hicieron diferentes modificaciones en ambos sistemas con el fin de que existiera concordancia en los resultados. Primero se realizó una pequeña evaluación de los floculadores y sedimentadores para observar cual de los seis (6) que se encuentran en planta operan en optimas condiciones para realizar la investigación. Se obtuvo que el floculador y sedimentador numero cuatro (4) y seis (6) obtuvieron mejores resultados.

Los ajustes en planta son a nivel de los motoreductor; sabiendo que el rango a utilizar en el mismo es de 0,89 a 13,88 s^{-1} . Las modificaciones realizadas oscilaron entre 2, 4 y 6 s^{-1} (Tabla 3.3); valores dentro del rango y no tan cercanos a los extremos ya que al apagar los motores por completo solo se obtenía una acumulación de lodos en los floculadores que influye negativamente en la calidad del agua sedimentada de la planta y tampoco se llevo hasta el máximo del rango ya que por teoría se sabe que puede existir un cizallamiento del flóculo por efectos de mezclado excesivo en la etapa de floculación.



Tabla 3. 3 Equivalencias de gradientes mecánicos en segundos para ajuste de motorreductores

Gradiente (s⁻¹)	rpm (Planta)	rps (Planta)	ω (rad/s)	Giro de eje (s)	Giro de motor (s)
2	0,568	0,0094	0,059	105,70	26,3
4	0,901	0,015	0,094	66,59	16,6
6	1,181	0,019	0,124	50,82	12,7

El primer ensayo empleado consistió en realizar pruebas de jarras para distintas calidades de agua cruda, ajustándose los gradientes de mezcla y tiempos de retención según el caudal de entrada que se trabaja en ese momento en planta; con variaciones en la floculación mecánica igual a las modificaciones ya hechas en los motoredutores. Cada prueba de jarra indica una dosis mejorada de coagulante que luego de ser determinada fue aplicada en planta.

Luego de aplicada la dosis y transcurrido el tiempo de retención en cada etapa, es realizado un perfil del agua sedimentada en distintos lugares del sedimentador donde son evaluados los parámetros de calidad más influyentes (turbiedad, pH, color, aluminio residual y porcentaje de remoción). Al final estos resultados eran comparados con los obtenidos por la dosis mejorada en la prueba de jarra. Estos resultados se encuentran ubicados en el anexo D.

3.4.2 Importancia del punto de captación de muestra en sedimentador

Es considerable asumir que en la zona de salida de los sedimentadores se encontrará el agua con mejor calidad, ya que la misma mantiene mayor tiempo de retención y contribuye a una mayor cantidad de flóculo sedimentados en el mismo. Esta etapa se utilizó para conocer cuál es la zona verdadera del sedimentador donde la mayor cantidad de flóculos ha sedimentado y se llega a obtener la mejor calidad de agua dentro del



proceso. Luego de realizar la correspondiente prueba de jarra para diferentes calidades, y fijados los parámetros antes mencionados en dicho ensayo y obtenida la dosis mejorada de coagulante (sección 3.4.1), se dosifica en planta y se espera el mismo tiempo de retención total correspondiente al caudal utilizado.

Al instante se realizó un perfil mucho más amplio dentro de los sedimentadores cuatro (4) y seis (6). Este perfil consistía en tomar muestras de agua dentro del sedimentador, al inicio (después del corte), a la mitad y en la canaleta (inicio, mitad y final). Figura (3.13).

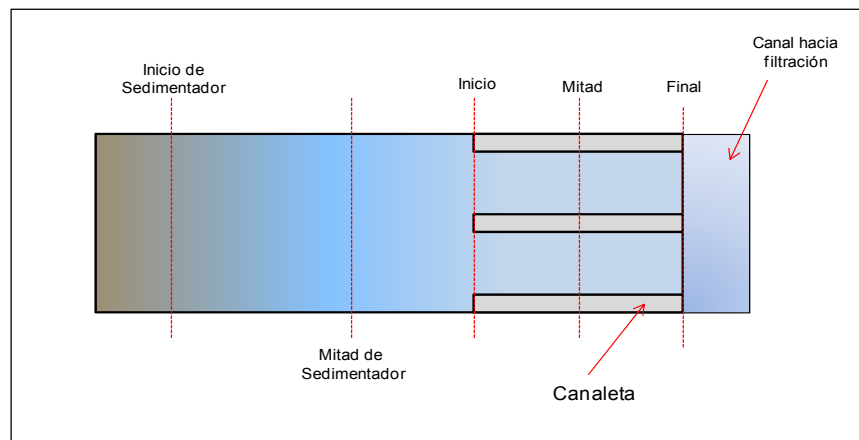


Figura 3. 13 Puntos de captación de muestra en el sedimentador.

La primera muestra no es tomada exactamente al inicio del sedimentador porque en el mismo existe gran abundancia de flóculo y no tendría ninguna relevancia su estudio. El “corte” es el punto del proceso de sedimentación donde el flóculo inicia su decantación; este punto se puede observar a simple vista cuando en el sedimentador la zona con mayor turbiedad pasa a tener un sobrenadante limpio sin mayor presencia de sólidos suspendidos (Figura 3.14).



Figura 3. 14 Ubicación del corte del tratamiento en sedimentador.

Finalmente son evaluados los parámetros de calidad (turbiedad, color, aluminio residual y porcentaje de remoción) de cada muestra con el fin de saber cuál de estos puntos tiene mayor similitud con las calidades obtenidas por la dosis mejorada de las pruebas de jarras y obtener el gradiente mecánico más favorable para el proceso de floculación. Estos resultados se encuentran reflejados en el anexo D.

3.4.3 Variación del gradiente de mecánico en laboratorio

Toda planta presenta diferentes problemas de producción y mantenimiento que generan complicaciones dentro del proceso; así se determine la mejor dosis de coagulante a usar para un tipo de calidad de agua y ajustes de gradientes de mezcla efectivos, no es 100% valedero que dicho tratamiento trabaje de igual manera que en un ensayo de prueba de jarra.

En las secciones anteriores se hacen comparaciones del tratamiento en planta con el ensayo de jarra y aunque sea posible percibir la mejora de la calidad del agua al utilizar uno u otro gradiente de mezcla mecánico, no se



puede ver con exactitud cuál es el gradiente más efectivo en el proceso. Por esto en esta etapa se hace uso exclusivo del ensayo de prueba de jarra. Sabiendo que el mismo es un sistema ideal donde los agentes que llegue a afectar dicho proceso serán pocos y se pueden resolver inmediatamente.

En esta etapa se realizan pruebas de jarra utilizando una misma calidad de agua cruda, gradientes de mezcla hidráulicos de acuerdo al caudal a usar y diferentes ajustes de gradientes de mezcla mecánicos que oscilan entre 0, 2, 4, 6 y 8 s⁻¹. Cada ajuste requerirá de una dosis mejorada diferente, y es aquí cuando se percibe la influencia de la variación del gradiente mecánico. Este ensayo se realiza con el fin de determinar cuál es el gradiente mecánico más efectivo para la floculación sin importar la calidad de agua que se presente en la planta y la variación de la dosis mejorada en cada ajuste, observándose la reducción en dicha dosis y la mejora en la calidad del agua sedimentada. Estos resultados se encuentran reflejados en el anexo D.

3.5 Propuesta de mejoras en el proceso de potabilización de la planta la guairita

3.5.1 Evaluación del proceso de potabilización

A medida que se cumplía el objetivo cuatro (4), se pudo observar los tipos de agentes que afectaban al proceso de potabilización; a pesar de que las simulaciones en pruebas de jarra fueron adaptadas a las situaciones reales del proceso en planta nunca ambas situaciones suministraban resultados exactamente iguales. Es cierto que la prueba de jarra es un sistema ideal y la planta un sistema real afectado por problemas operacionales y de mantenimiento de estaciones, pero existen una serie de variables teóricas y externas que pueden llegar a afectar dicho proceso, una



de ellas son la carga superficial o velocidad superficial crítica en el sedimentador y velocidad del flujo en el mismo.

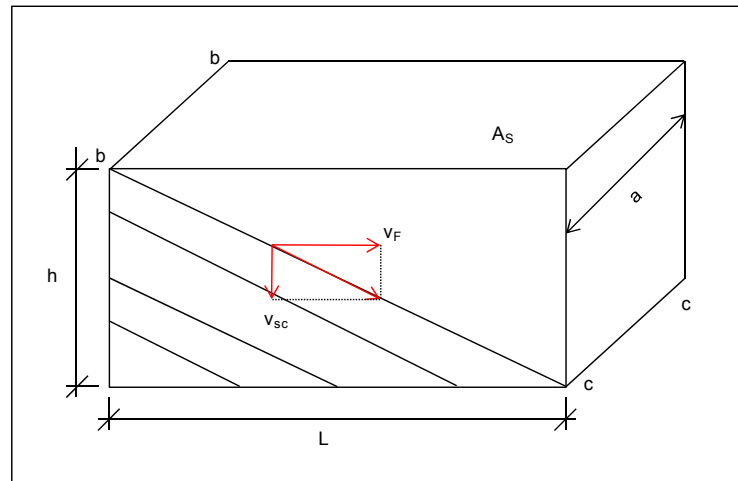


Figura 3. 15 Comportamiento de partículas de diferentes velocidades en sedimentador (Arboleda, 1992).

Suponiendo un sistema ideal de sedimentación de clarificación tipo 1, diseñado para eliminar el 100% de las partículas que tengan una determinada velocidad de sedimentación crítica v_{sc} o mayor, que son las que estando en las posiciones extremas b-b de la zona de sedimentación son retenidas en las posiciones extremas c-c de la zona de lodos (Figura 3.15).

De la semejanza de triángulos formados por h y L y por el diagrama vectorial de velocidades se tiene

$$\frac{v_{sc}}{v_F} = \frac{h}{L} \quad (\text{Ec. 3.33})$$



Donde:

v_{sc} = Carga superficial o velocidad de sedimentación crítica de partícula $\left(\frac{m^3}{m^2 \cdot d}\right)$

v_F = Velocidad horizontal del flujo $\left(m/d\right)$

h = Nivel de agua en sedimentador (m)

L = Longitud de sedimentador (m)

Si

$$v_{sc} = \frac{Q}{A_s} \quad (\text{Ec. 3.34})$$

Donde:

Q = Caudal $\left(m^3/d\right)$

A_s = Área superficial del sedimentador (m^2)

Recordando que el sedimentador cuenta con un área superficial de $2240,99 \text{ m}^2$ y asumiendo un caudal de $6,2 \text{ m}^3/s$ para 5 sedimentadores en uso se obtiene:

$$v_{sc} = \frac{\left(\frac{6,2 \frac{m^3}{s} \times \frac{86400 \text{ s}}{1 \text{ d}}}{5}\right)}{2240,99 \text{ m}^2} = 47,807 \frac{m^3}{m^2 d}$$

Si se despeja de la ecuación (3.33) a v_F se obtiene que:



$$v_F = \frac{L \times v_{sc}}{h} \quad (\text{Ec. 3.35})$$

Acotando que el sedimentador tiene 91,32 m de longitud y un nivel de agua de 3,386 m, se obtiene que la velocidad horizontal del flujo es de:

$$v_F = \frac{91,32 \text{ m} \times 47,807 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{d}}}{3,386 \text{ m}} = 1289,36 \text{ m/d}$$

$$v_F = 1289,36 \text{ m/d} \times \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \times \frac{1 \text{ d}}{86400 \text{ s}} = 1,492 \text{ cm/s}$$

En las tablas 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7 de la sección 4.5 se hallan los resultados de carga superficial y velocidad del flujo para los diferentes números de líneas y caudales con que opera normalmente la planta La Guairita para 5 y 6 sedimentadores en uso. A pesar de que en este caso se habla de sistemas ideales, estos registros no podrían encontrarse en los ensayos de laboratorio, estas velocidades dependen exclusivamente de las dimensiones extremas de un sedimentador real y del caudal de alimentación ausente en las pruebas de jarra.

En los sedimentadores el comportamiento de partículas de diferentes velocidades de asentamiento mantienen una trayectoria recta en la zona de sedimentación debido a la composición de dos movimientos: el de desplazamiento con el fluido de velocidad v_F y el de sedimentación respecto al fluido de velocidad v_s . En prueba de jarra se presenta solo la velocidad respecto al fluido o velocidad de sedimentación y para ser determinada requiere de la densidad del flóculo. Para esta investigación no se pudo realizar tal cálculo por ausencia del equipo que suministra dicha densidad.



3.6 Equipos, materiales, sustancias y herramientas

3.6.1 Equipos

- 1 Calculadoras HP50G.
- Compaq Presario C769LA Notebook PC. Intel® Core™ 2 Duo T5550 @ 2048 MB, 667 MHz, 169 MB de Disco Duro.
- Impresora HP Deskjet D2400 series.
- Prueba de Jarras: Cat N°7790-901B/ 120V8A/ 6*2L. Marca Phipps&Bird, Serial: Fab:200120864 HC: 8111
- Balanza analítica. Máx. 160 g. Marca Sartorius, Serial: HC: 230403- 2277 Prov: 8204
- Conductímetro. Marca Orion, Modelo 115. Serial: Fab: 2684, HC: 8121
- Turbidímetro de banco para laboratorio: 115 V/0.15 A, Marca Hach, Modelo 2100AN. Serial: Fab: 981100001543 HC: 8118
- Medidor de pH laboratorio – mesa. Marca Orion, Modelo 720
- Espectrofotómetro. Marca Spectronic® 20 Genesys, Modelo 4001/4, Serial:3SGA314077, HC: 8389
- Tubos Nessler
- Vaso de precipitado de 50 ml
- Cono Imhoff
- Balones aforados de 50 ml y 500 ml

3.6.2 Sustancias

- Sulfato de aluminio líquido (Tratamiento de aguas), Marca SATA – P, $\rho = 1,335 \text{ g/cm}^3 @ 25^\circ\text{C}$. Proveedor: FERRALCA
- Cloro a 99,70% peso, min. Proveedor: PEQUIVEN

3.6.3 Herramientas

- Microsoft Office Excel 2007

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se discute detalladamente todos los resultados obtenidos en esta investigación, haciendo mención de todas las mejoras relevantes que pueden ser aplicadas para el funcionamiento eficiente de los ensayos a nivel de laboratorio como el tratamiento aplicado al proceso en planta.

4.1 Gradientes de mezcla hidráulicos y tiempos de retención en cada etapa del proceso de potabilización

4.1.1 Tiempos de retención

El tiempo de retención depende principalmente de dos variables, el caudal y volumen; por esto a medida que las unidades del proceso de potabilización van aumentando de volumen el tiempo de retención del agua en las mismas es mayor. Considerando que la planta opera con diferentes números de fuentes que son conectadas a la misma mediante la estación 24; el personal de la misma se guía por un patrón de líneas que indica el número promedio de fuentes y caudal con que se está trabajando (tabla 4.1).



Tabla 4. 1 Número de líneas y caudal de alimentación que opera la planta La Guairita

Nº de Líneas	Caudal (L/s)
1	1.500
2	3.100
3	4.600
4	5.200
P*	6.200
5	6.400

P* = Caudal de alimentación promedio con que opera diariamente la planta La Guairita.

Se puede observar en las tablas A.1 y A.2 del anexo A que a medida que el número de líneas que trabajan en el proceso y el caudal de alimentación aumentan el tiempo de retención o detención del líquido en las diferentes etapas va disminuyendo. El tiempo de retención del líquido dentro del sistema de tuberías es muy pequeño (Tabla 4.2) considerándose que la mezcla rápida del coagulante en este tramo sería insuficiente, pero este se mantiene dentro de los parámetros de diseño ubicados en la tabla E.1. Se observa en la figura 4.1 que a medida que el número de líneas de fuentes que alimentan a la planta aumenta el tiempo de retención disminuye en el sistema de tubería.



Tabla 4.2 Tiempos de retención en el sistema de tuberías a diferentes caudales de alimentación manejados por la planta

Nº de Líneas	Caudal (L/s)	Tiempos de retención (s)
1	1.500	45,91
2	3.100	22,21
3	4.600	14,97
4	5.200	13,24
P*	6.200	11,11
5	6.400	10,76

P* = Caudal de alimentación promedio con que opera diariamente la planta La Guairita.

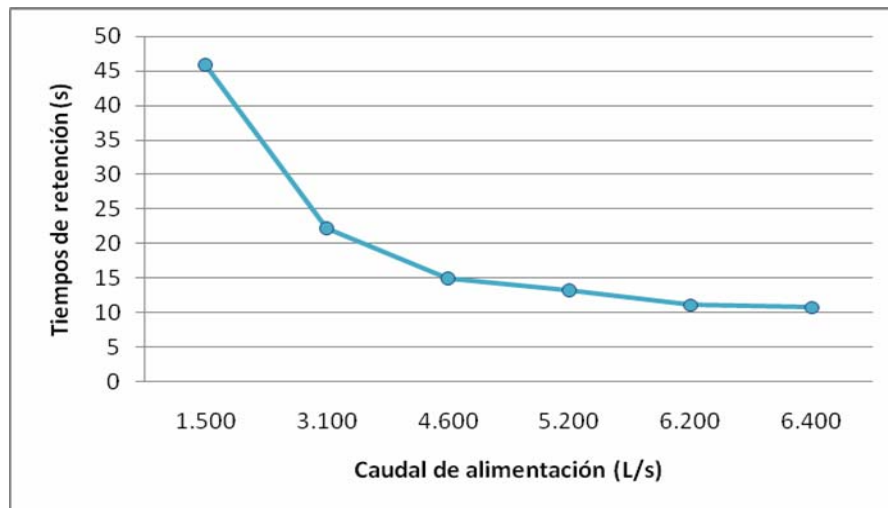


Figura 4.1 Variación del tiempo de retención en el sistema de tuberías a diferentes caudales de alimentación.



A diferencias de la mezcla rápida en la tanquilla o coagulador, se mantiene un tiempo de retención dentro de los parámetros de diseño ubicados en la tabla E.1 como se observa en la tabla 4.3 y A1 para caudales superiores a los 3200 L/s, pero mantiene la misma tendencia de disminución a medida que va aumentando el flujo (Figura 4.2).

Tabla 4.3 Tiempos de retención en la coagulador a diferentes caudales de alimentación manejados por la planta

Nº de Líneas	Caudal (L/s)	Tiempos de retención (s)
1	1.500	134,83
2	3.100	65,24
3	4.600	43,97
4	5.200	38,89
P*	6.200	32,62
5	6.400	31,6

P* = Caudal de alimentación promedio con que opera diariamente la planta La Guairita.

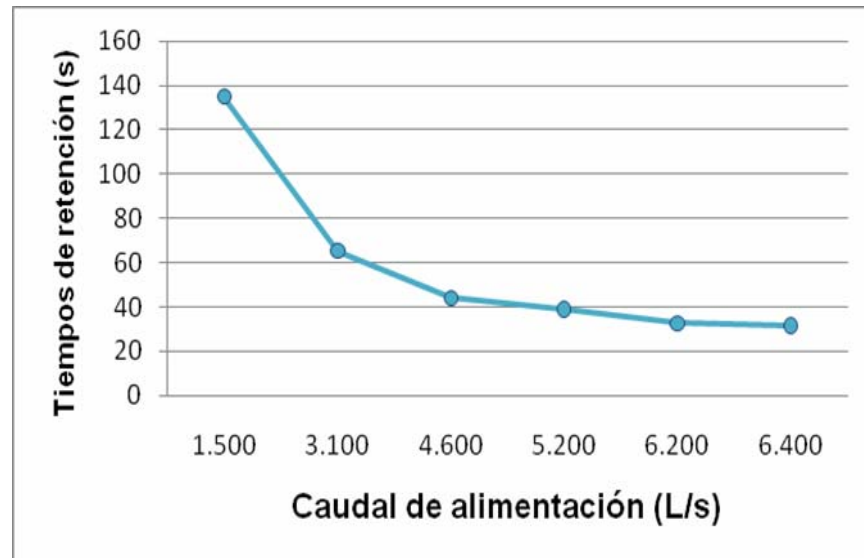


Figura 4.2 Variación del tiempo de retención en coagulador a diferentes caudales de alimentación.

En el caso de los floculadores y sedimentadores el tiempo también disminuye a medida que aumenta su volumen y caudal de alimentación a la planta como se observa en las figuras 4.3 y 4.4 para 5 floculadores en uso y las figuras A.2 y A.3 para 6 floculadores. Este tiempo se calculó en función del caudal promedio distribuido a cada unidad que trabaja en el proceso. Al momento de la investigación el número de floculadores y sedimentadores en uso eran de cinco (5) unidades por cada una; es decir que el caudal de entrada a la planta entre las cinco (5) unidades correspondería al flujo promedio de entrada a cada floculador y sedimentador.

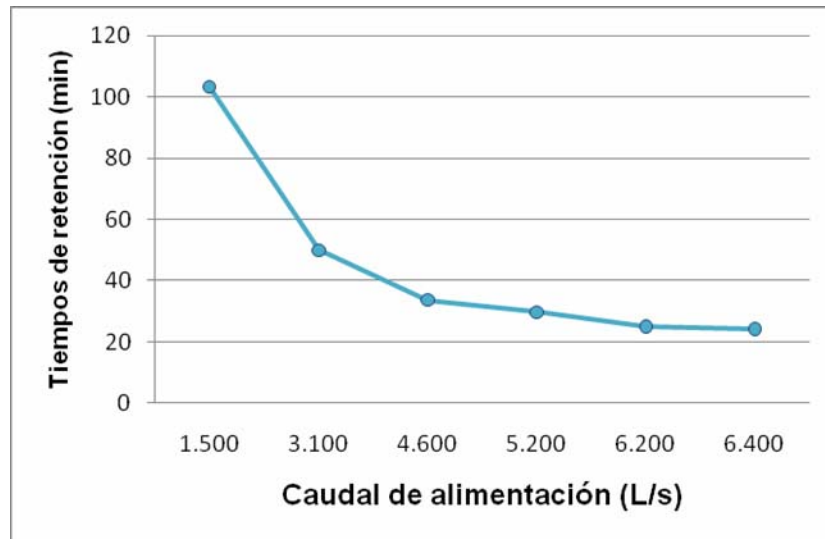


Figura 4.3 Variación del tiempo de retención en el floculador a diferentes caudales de alimentación con cinco (5) floculadores operando.

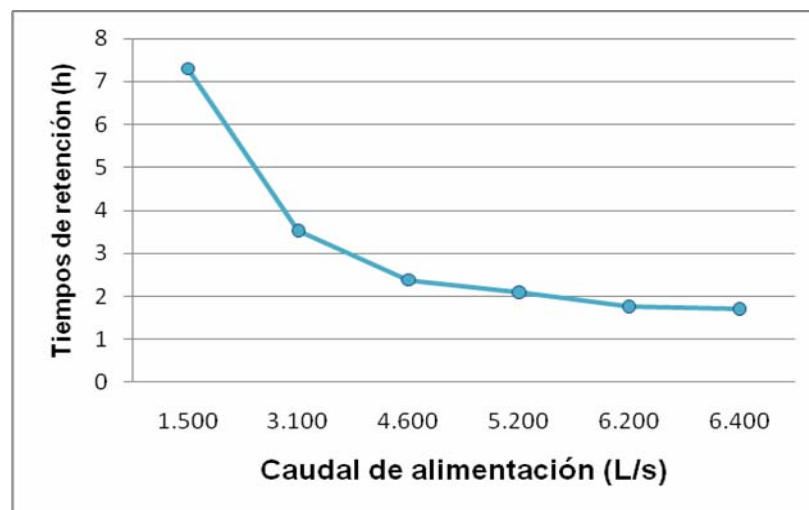


Figura 4. 4 Variación del tiempo de retención en el sedimentador a diferentes caudales de alimentación con cinco (5) sedimentadores operando.



De acuerdo a esto se puede observar en las tablas 4.4, 4.5, A.1 y A.2, que los resultados obtenidos en el floculador y sedimentador no solo varían en función del volumen y caudal al igual que las etapas anteriores sino que también cambian en función del número de floculadores y sedimentadores utilizados para el proceso. A medida que estas unidades aumentan en el proceso el tiempo de retención es mayor.

Tabla 4.4 Tiempos de retención en floculador a diferentes caudales de alimentación con cinco (5) unidades de floculación operando

Nº de Líneas	Caudal (L/s)	Tiempos de retención (s)
1	1.500	103,16
2	3.100	49,92
3	4.600	33,64
4	5.200	29,76
P*	6.200	24,96
5	6400	24,18

P* = Caudal de alimentación promedio con que opera diariamente la planta La Guairita.

En el caso de los floculadores a partir de un caudal de 5000 L/s en adelante el tiempo se encuentra dentro de los parámetros de diseño ubicados en la tabla E.1 y para los sedimentadores a partir de un caudal de 2700 a 5500 L/s; parámetros ubicados en la tabla E.2.



Tabla 4.5 Tiempos de retención en sedimentador a diferentes caudales de alimentación con cinco (5) unidades de sedimentación operando

Nº de Líneas	Caudal (L/s)	Tiempos de retención (s)
1	1.500	7,3
2	3.100	3,53
3	4.600	2,38
4	5.200	2,1
P*	6.200	1,77
5	6.400	1,71

P* = Caudal de alimentación promedio con que opera diariamente la planta La Guairita.

4.1.2 Gradiente de mezcla hidráulico

El gradiente de velocidad o gradiente de mezcla depende principalmente del tiempo de retención y las pérdidas por carga presentes en cada una de las etapas del proceso de potabilización; estas no necesariamente son despreciables a la hora del cálculo del gradiente pero si tienen menor influencia que el tiempo de retención que involucra el caudal de alimentación que se utiliza para dicho proceso.

El tiempo de retención manifiesta un comportamiento inversamente proporcional al gradiente de mezcla; a medida que el mismo disminuye el gradiente aumenta, en consecuencia al ir aumentando el caudal de alimentación el gradiente incrementa en cada una de las etapas como se manifiesta en las tablas A.3 y A.4 del anexo A.



Al igual que el tiempo de retención, en el estudio del comportamiento del gradiente de mezcla en función del número de líneas con que trabaja la planta La Guairita (tabla 4.1) para cada una de las etapas del proceso; el gradiente de mezcla en el sistema de tubería va creciendo considerablemente mientras que el caudal va aumentando, a diferencia del gradiente en el coagulador que aumenta poco a poco como se observa en las figuras 4.5 y 4.6 respectivamente; a pesar de que ambas etapas componen la mezcla rápida del proceso se puede percibir que la misma no es del todo suficiente; se mantienen altos gradientes en el sistema de tuberías fuera de los parámetros de diseño y además su tiempo de retención es muy corto y escaso para la mezcla homogénea del coagulante con el agua cruda (Tabla 4.6).

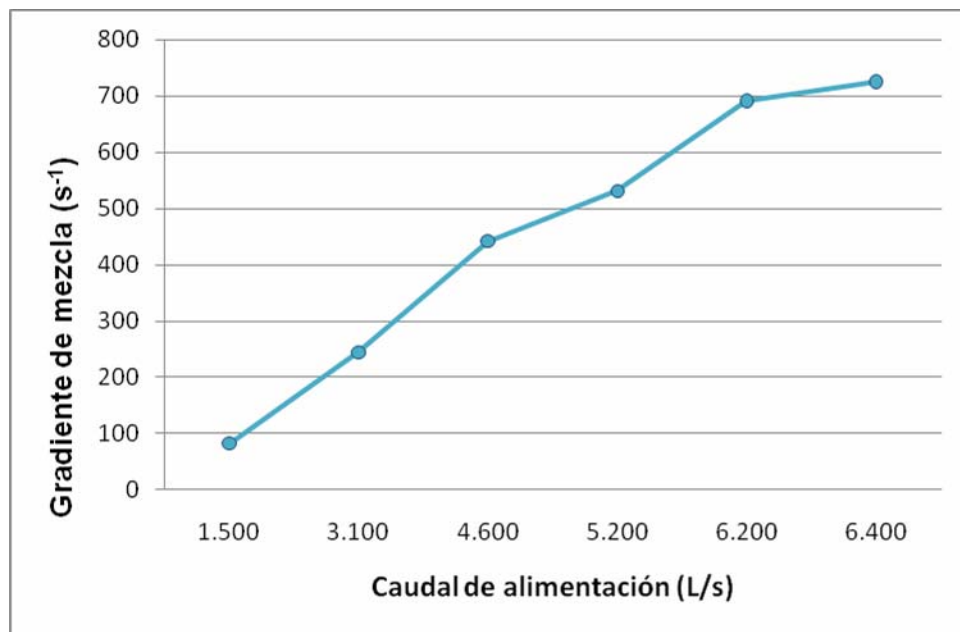


Figura 4. 5 Variación del gradiente de mezcla en el sistema de tuberías a diferentes caudales de alimentación.



Tabla 4.6 Gradiente de mezcla en el sistema de tubería a diferentes caudales de alimentación manejados por la planta

Nº de Líneas	Caudal (L/s)	Gradiente de mezcla (s^{-1})
1	1.500	82,24
2	3.100	244,35
3	4.600	441,68
4	5.200	530,85
P*	6.200	691,12
5	6.400	724,83

P* = Caudal de alimentación promedio con que opera diariamente la planta La Guairita.

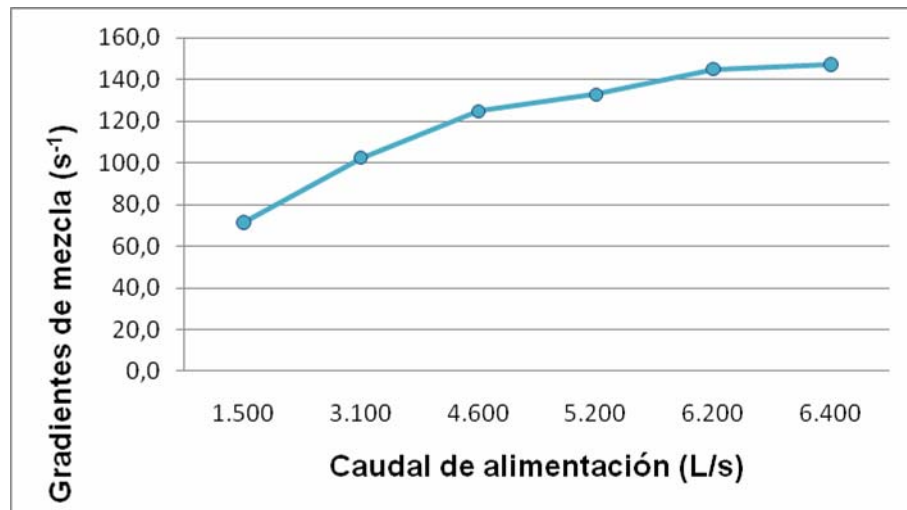


Figura 4. 6 Variación del gradiente de mezcla en el coagulador a diferentes caudales de alimentación.



Luego el fluido retoma una nueva mezcla en el coagulador un poco más duradera pero con un gradiente muy pequeño (Tabla 4.7) que si entran dentro de los parámetros de diseño pero que no logra cumplir con el objetivo esencial del proceso de coagulación que es desestabilizar las partículas coloidales que se encuentran en el agua con la ayuda de una dosis apropiada de coagulante.

Tabla 4.7 Gradiente de mezcla en el coagulador a diferentes caudales de alimentación manejados por la planta

Nº de Líneas	Caudal (L/s)	Gradiente de mezcla (s⁻¹)
1	1.500	71,3
2	3.100	102,5
3	4.600	124,85
4	5.200	132,75
P*	6.200	144,95
5	6.400	147,27

P* = Caudal de alimentación promedio con que opera diariamente la planta La Guairita.

La floculación hidráulica mantiene un gradiente de mezcla promedio al asignado por los parámetros de diseño ubicados en la tabla E.1, el mismo va incrementando a medida que el caudal de alimentación va aumentando, pero si se genera cierta diferencia cuando se llega a trabajar con otra unidad de



floculación. Cuando se trabaja con cinco (5) unidades el gradiente de mezcla es un poco mayor pero no extremadamente diferente a cuando se trabaja con seis (6) unidades de floculación para el proceso de potabilización como se presentan en las figuras 4.7 y A.4. Para ambos casos los gradientes están dentro de los parámetros de diseño para caudales desde 2500 L/s en adelante como se observa en las tablas 4.8, A.3 y A.4.

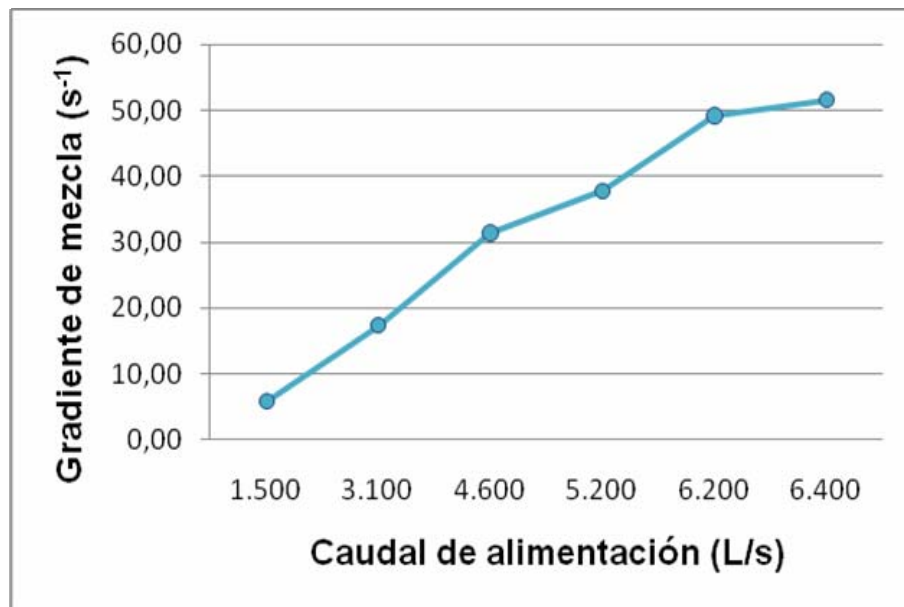


Figura 4. 7 Variación del gradiente de mezcla en el floculador hidráulico a diferentes caudales con cinco (5) unidades de floculación operando.



Tabla 4.8 Gradiente de mezcla en floculador hidráulico a diferentes caudales de alimentación con cinco (5) unidades de floculación operando

Nº de Líneas	Caudal (L/s)	Gradiente de mezcla (s⁻¹)
1	1.500	5,85
2	3.100	17,39
3	4.600	31,43
4	5.200	37,77
P*	6.200	49,18
5	6.400	51,58

P* = Caudal de alimentación promedio con que opera diariamente la planta La Guairita.

4.2 Tiempo de sedimentación experimental

4.2.1 Ajuste de gradiente mecánico de mezcla en floculación

Antes de llegar a determinar el tiempo de sedimentación más apropiado para el ensayo de prueba de jarra fue necesario establecer un escenario parecido al utilizado en la planta. La etapa de floculación de la misma trabaja con una floculación hidráulica y mecánica a la vez, por ello en la sección 3.2.2 se obtuvo el gradiente mecánico máximo y mínimo que se puede ajustar en los motorreductores de las paletas mecánicas en los floculadores; con el fin de que el gradiente hidráulico y el mínimo gradiente mecánico



puedan ser sumados y aplicados al ensayo de pruebas de jarra para la determinación del tiempo de sedimentación.

Los resultados de esta suma de gradientes se encuentran reflejados en las tablas 4.9 y B.1 del anexo B, donde se puede observar que a medida que aumenta el caudal de alimentación también aumenta el gradiente hidráulico y la adición del gradiente mecánico al mismo. Luego de obtener la suma de ambos gradientes, se hizo necesario de su conversión a revoluciones por minutos para que dichos gradientes puedan ser utilizado en el equipo de prueba de jarra.

En la sección 3.2.2.1 se observa la figura 3.11, representada por el ábaco que relaciona los gradientes de velocidad con las revoluciones por minutos de la paleta de acuerdo al tipo de jarra usado por el equipo. La tabla 4.10 muestra los gradientes en revoluciones por minutos de la mezcla rápida y lenta con sus respectivos tiempos de retención utilizados para la determinación del tiempo de sedimentación en prueba de jarra; indicando que los caudales utilizados para cada prueba fueron los utilizados por la planta al momento de realizar dichas pruebas. En esta última se percibe una sola cifra de revoluciones por minuto en la etapa de floculación, la cual engloba la suma del gradiente hidráulico con el gradiente mecánico presente en la misma.



Tabla 4. 9 Ajuste de gradientes mecánicos e hidráulicos para cada caudal de alimentación con cinco (5) floculadores en operación

Nº de Líneas	Caudal (L/s)	Gradiente de mezcla hidráulico en floculador (s^{-1})	Gradientes de mezcla total en floculador	
			Gradiente mecánico mín. ($0,89 s^{-1}$)	Gradiente mecánico máx. ($13,88 s^{-1}$)
1	1.500	5,85	6,74	19,73
-	2.700	14,13	15,02	28,01
2	3.100	17,39	18,28	31,27
3	4.600	31,43	32,32	45,31
4	5.200	37,77	38,66	51,65
P*	6.200	49,18	50,07	63,06
5	6.400	51,58	52,47	65,46

P* = Caudal de alimentación promedio con que opera diariamente la planta La Guairita.

Tabla 4. 10 Gradientes y tiempos de retención ajustados en prueba de jarra para la determinación del tiempo de sedimentación

Caudal (L/s)	Sistema de Tuberías		Coagulador		Floculación	
	Tiempo de retención	Gradiente (rpm)	Tiempo de retención	Gradiente (rpm)	Tiempo de retención	Gradiente (rpm)
2.700	26"	145	1'15"	82	59'31"	20
5.200	13"	270	39"	100	29'46"	45
6.400	11"	320	32"	120	24'11"	53



Para un caudal de 2700 L/s la tabla 4.9 define un gradiente hidráulico de $4,13 \text{ s}^{-1}$, si es anexando a este el mínimo gradiente mecánico permitido ($0,89 \text{ s}^{-1}$) se obtiene un resultado de $15,02 \text{ s}^{-1}$ que al utilizar la figura 3.11 para convertir dicho gradiente total a revoluciones por minuto, se obtiene que $15,02 \text{ s}^{-1}$ equivale aproximadamente a 20 rpm (Tabla 4.10). Es importante recordar que para dichas pruebas de tiempo de sedimentación solo se hizo uso del gradiente hidráulico para 5 floculadores en uso y el mínimo gradiente mecánico permitido por los motorreductores.

4.2.2 Determinación de tiempo de sedimentación en prueba de jarra

Con los gradientes en el sistema de tuberías, coagulador y floculador expresados en revoluciones por minuto, se realizaron las pruebas de jarra para determinar el tiempo de sedimentación más apropiado para este ensayo. Desde la tabla B.2 a B.10 ubicadas en el anexo B se pueden observar los resultados obtenidos en laboratorio para la determinación de dicho tiempo, mediante el uso de diferentes caudales y calidades de agua cruda.

Se indicó en color amarillo las jarras en donde se obtuvieron resultados similares a los permitidos por las normas sanitarias de calidad del agua potable por la cual rige la planta Guairita (Tabla E.3). Luego de realizadas las pruebas de jarra se realizó un análisis más específico por cada propiedad fisicoquímica evaluada en dicho ensayo, para obtener con mayor exactitud el tiempo a determinar.

4.2.2.1 Turbiedad

Por lo que se muestra en la figura B.1 para el caso de la turbiedad en la primera parte de la investigación, a los 30 minutos de haber sedimentado la muestra en la jarra se obtienen valores dentro de las normas permitidas para



el agua sedimentada. Para asegurar que el tiempo de sedimentación no llegue a ser menor que los 30 minutos obtenidos por las primeras cinco (5) pruebas, se realizaron una segunda parte con cuatro pruebas a menor tiempo de sedimentación; estos resultados se perciben en la figura 4.8. Se observa que a los 25 minutos todas las pruebas aciertan con una buena calidad de resultados que incluso están dentro de las normas sanitarias de calidad del agua sedimentada (5 NTU) de la planta La Guairita.

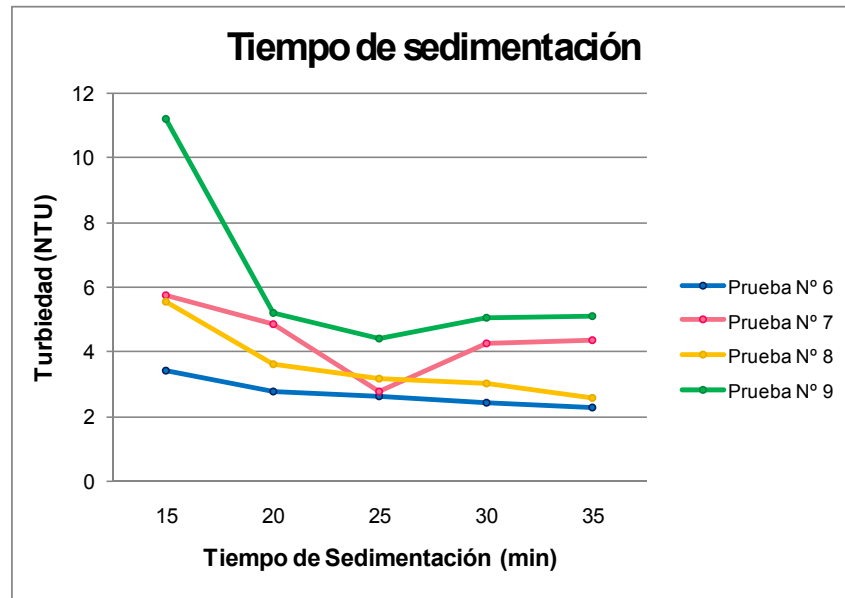


Figura 4. 8 Variación de la turbiedad en cada prueba de jarra con respecto al tiempo de sedimentación (Parte II).

Existe un punto resaltante en la prueba número 7 donde a pesar de existir un buen valor de turbiedad, no hay concordancia con el resto de los tiempos de la prueba; esto pudo deberse a un mal manejo de toma de muestra o mal lectura del turbidímetro, pero solo se toma como un error experimental que no interfiere en los resultados finales. Para rectificar con las



pruebas anteriores, se percibe que a los 30 minutos de sedimentación es cuando cada una de las muestras presenta una estabilidad en la turbiedad.

4.2.2.2 Color

Siguiendo con el análisis de los parámetros fisicoquímicos de cada prueba de jarra, ahora se observan los resultados de la primera parte para el color en la figura B.2, donde el agua sedimentada según la norma de potabilización aplicada en planta debería de estar entre 5 y 12 unidades de color verdadero (UCV), manteniéndose las primeras cinco (5) pruebas dentro del rango y a partir de los 30 minutos de sedimentación se mantiene el color y solo en algunos casos existen pequeñas variaciones que no salen del rango establecido.

Cuando va aumentando el tiempo se van presentando aumentos en el color que finalmente regresan al mismo estado que tenían a los 30 minutos. Al igual que la turbiedad, el color también es analizado en la segunda parte a menores tiempos de sedimentación como se observa en la figura 4.9, obteniéndose que para los 15 minutos los valores son altos pero paulatinamente van disminuyendo hasta llegar a valores que se mantienen a los 30 minutos de sedimentación que entran dentro de la norma de potabilización aplicada en planta.

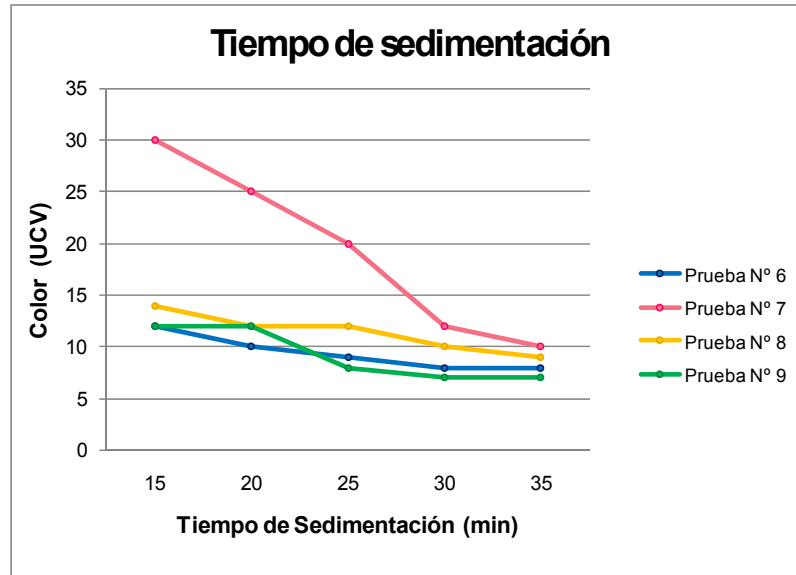


Figura 4. 9 Variación del color en cada prueba de jarra con respecto al tiempo de sedimentación (Parte II).

4.2.2.3 pH

Para el caso del pH los resultados en todas las pruebas fueron favorables, los valores estaban dentro de las normas sanitarias de agua potable ($\text{pH} = 6,5 - 8,5$) y su tendencia era a disminuir a medida que aumentaba el tiempo de sedimentación como aquí se observa desde la tablas B.2 a la B.6. El pH influye en el color del agua; este a medida que tiende a subir hace que incremente el color. A efectos de las pruebas de tiempo de sedimentación ambas propiedades se mantienen dentro de la norma, pero para el caso del pH no se llega distinguir cual sería el mejor tiempo para los ensayos de jarra en las primeras cinco (5) pruebas, el comportamiento es confuso y diferente para cada una de ellas.

Disminuyendo el tiempo de las pruebas el comportamiento es el mismo que las pruebas anteriores, el pH tiende a disminuir a medida que aumenta el



tiempo de sedimentación pero manteniendo sus valores dentro de la norma como se muestra en las tablas B.7 a la B.10. La prueba número seis (6) y nueve (9) son las únicas que se salen de la norma como se percibe en la figura B.3, aunque la tendencia sigue siendo la misma no existe un valor de pH que indique alguna conducta de relevancia que pueda referirse al tiempo de sedimentación.

4.2.2.4 Sólidos Sedimentables

Luego de realizar evaluaciones de control dentro del ensayo de jarra como turbiedad, color y pH; se hizo necesaria la determinación de nuevos parámetros fisicoquímicos en el agua que concluyeran el tiempo de sedimentación más apropiado para dicho ensayo. La determinación de los sólidos suspendidos y sólidos sedimentables fueron los primeros por estudiar, obteniendo para el primer caso valores dentro de la norma pero muy bajos para ser analizados. Estos resultados se encuentran reflejados desde la tabla B.4 a la B.9 del anexo B.

En el caso de los sólidos sedimentables, a medida que incrementa el tiempo de sedimentación los mismos van aumentando como se muestra en la figura 4.10 y B.4 ubicada en el anexo B. En las primeras pruebas evaluadas se observa como aumentan los sólidos decantados con el transcurso del tiempo, lo que indica la obtención de una mejor calidad del agua sedimentada a medida que este transcurre, pero no incide ningún valor la cual se pueda tomar como tiempo de sedimentación

Es bueno resaltar que a la hora de leer la cantidad de sólidos sedimentados para estas pruebas existían desviaciones en los valores que no reflejaban el verdadero resultado de las mismas, cuando se leía al inicio de la prueba se observaba mayor cantidad de sólidos en el cono que cuando



se observaba al final, lo que se dedujo que por efectos del peso de los mismos llegaban a compactarse.

Debido a esto se realizaron pruebas a una menor escala de tiempo donde los resultados reflejados fueron mejores que los anteriores; en el cono Imhoff se podía leer a mayor precisión los mL/L que se acumulaban sin el factor de error que generaba la compactación de los mismos como ocurría en las pasadas pruebas. La figura 4.10 se observa que al pasar los 30 minutos de sedimentación las diferentes pruebas mantienen el valor de lectura de sólidos a ese tiempo hasta llegar a finalizar la misma, demostrándose que se ha decantado la mayoría de sólidos presentes en ese tiempo.

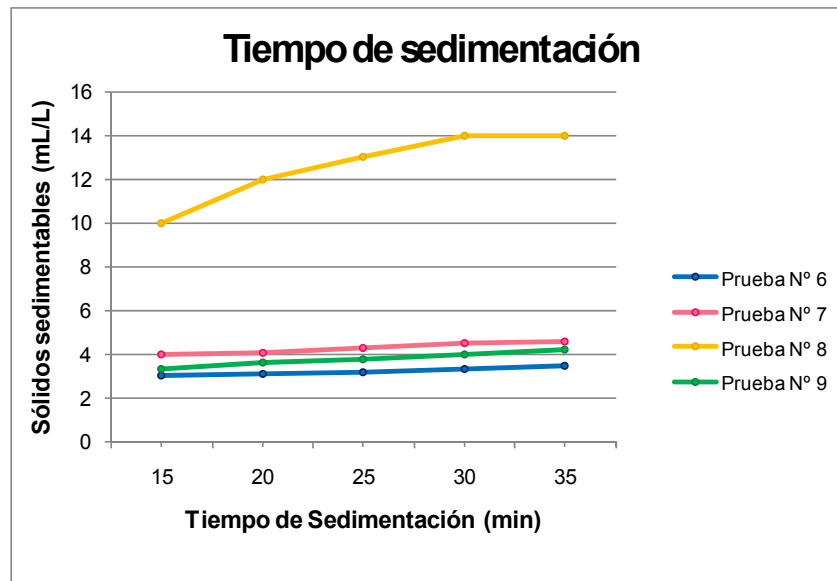


Figura 4. 10 Variación de sólidos sedimentables en cada prueba de jarra con respecto al tiempo de sedimentación (Parte II).



4.2.2.5 Aluminio residual

El aluminio soluble, coloidal e insoluble puede encontrarse en aguas tratadas o en aguas residuales como residuo de la coagulación con material que contiene aluminio. Los coagulantes aluminicos dejan un remanente de metal que, en algunos casos, puede llegar a niveles no deseados. Para el caso de la prueba de tiempo de sedimentación se toma al aluminio residual como un factor indicador de presencia de flóculos en el agua sedimentada.

En esta prueba se manifiestan muchas variaciones que no terminan de concluir cual es el tiempo adecuado de sedimentación experimental; es razonable asumir que se debería de obtener el mismo comportamiento que en el caso de los sólidos sedimentables, ya que si a medida que transcurre más el tiempo se tiene menos cantidad de flóculos en el agua y a su vez menor cantidad de aluminio.

En la tabla 4.11 se observa que a medida que transcurre el tiempo disminuye la cantidad de aluminio residual en la muestra, este comportamiento no se mantiene. Existen casos donde al finalizar la prueba (Tablas B.7 a B.9 del anexo B) las cantidades iniciales regresan de nuevo, sin especificar cuál es el mejor tiempo para la sedimentación. Pero se llega a visualizar que al final de cada prueba la cantidad de aluminio es menor que al inicio de la misma y este valor entra dentro de las normas sanitarias de calidad del agua potable que utiliza la planta potabilizadora



Tabla 4. 11 Resultados de aluminio residual en cada prueba de jarra para la determinación del tiempo de sedimentación experimental

Tiempo de sedimentación (min)	Aluminio residual (mg/L)			
	Prueba N°			
	6	7	8	9
15	0,16	0,16	0,24	0,18
20	0,13	0,16	0,15	0,14
25	0,13	0,13	0,2	0,16
30	0,14	0,15	0,19	0,14
35	0,13	0,1	0,16	0,14

4.3 CÁLCULO DE LA DOSIS MEJORADA DE COAGULANTE

Luego de obtenido el tiempo de sedimentación a usar en cada prueba de jarra se determinó la dosis mejorada u optima de coagulante en diferentes calidades de agua cruda a distintos caudales de alimentación; estos se manipularon acorde a las operaciones en planta a la hora de la ejecución de dicho objetivo. En cada ensayo se variaron los gradientes mecánicos en 0, 2 y 4 s^{-1} para simular diferentes situaciones en las que trabajaban los floculadores al momento de la investigación. En la tabla C.1 del anexo C se pueden observar los gradientes y tiempos de retención ajustados en las pruebas de jarra de acuerdo al caudal de alimentación que se operaba en planta. Es importante recordar que para dichas pruebas de dosis mejorada solo se hizo uso de los gradientes hidráulicos para 5 floculadores en uso.



Tabla 4. 12 Gradientes y tiempos de retención ajustados en prueba de jarra para la determinación de la dosis mejorada

Caudal (L/s)	Sistema de Tuberías		Coagulador		Floculador			
	Tiempo de retención	Gradiente (rpm)	Tiempo de retención	Gradiente (rpm)	Tiempo de retención	Gradiente mecánico 0 s ⁻¹ (rpm)	Gradiente mecánico 2 s ⁻¹ (rpm)	Gradiente mecánico 4 s ⁻¹ (rpm)
5.400	13"	280	37"	105	28'40"			48
5.800	12"	300	35"	110	26'41"		50	
5.900	12"	310	34"	110	26'14"		50	
6.000	11"	315	34"	110	25'47"	50	51	
6.200	11"	320	33"	120	24'58"		52	54
6.300	11"	320	32"	120	24'34"	52	54	55
6.400	11"	320	32"	120	24'11"	52	54	
6.500	11"	330	31"	125	23'49"		55	56

4.3.1 Determinación de la dosis mejorada en prueba de jarra

El ensayo de pruebas de jarra son simulaciones en el laboratorio de las operaciones de coagulación, floculación y sedimentación que se realizan en una planta potabilizadora; estas determinan la dosis de coagulante más efectiva para el tratamiento mediante la agitación de aspas que logran que las partículas coloidales desestabilizadas por el coagulante choquen unas con las otras y logren aglomerarse para formar coágulos mayores que puedan asentar al finalizar la agitación.

Se considera que la dosis optima o mejorada de coagulante es la dosis más baja que arroja resultados de turbiedad, color y pH en el agua sedimentada dentro de las normas sanitarias de calidad del agua potable por la cual se rige la planta La Guairita (Tabla E.3). Para este objetivo fueron realizadas 22 pruebas de jarras con muestras de diferentes calidades de agua cruda y distintos ajustes de gradientes hidráulicos que varían de acuerdo al caudal de alimentación con que trabajaba la planta en el momento de la prueba, en combinación con los gradientes mecánicos ya descritos anteriormente. Estas pruebas se encuentran ubicadas en el anexo C, de la



tabla C.1 a la C.10 para bajas turbiedades y de la C.12 a la C.23 para medianas-altas turbiedades.

De acuerdo al modo de trabajo en el laboratorio de calidad de la planta, se considera que las bajas turbiedades oscilan entre 5 y 55 NTU, de 56 a 70 NTU para medianas turbiedades y las altas de 71 a 400 NTU aproximadamente. Haciendo referencia a esto se clasificaron las pruebas en bajas turbiedades y medianas - altas turbiedades del agua cruda utilizada, graficando los resultados de acuerdo al porcentaje de remoción de turbiedad y color en función a la dosis de coagulante (sulfato de aluminio en estado líquido). En las figuras 4.11, C.1, y C.2 se observa como favorece la dosis mejorada de 40 ppm de coagulante a tratamientos con muestras de agua cruda de baja turbiedad.

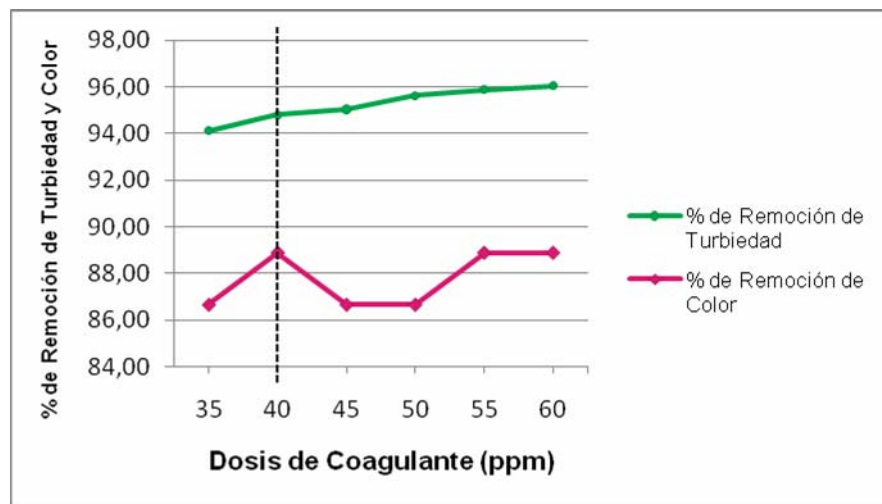


Figura 4. 11 Variación del porcentaje de remoción de turbiedad y color en la dosificación de coagulante de la prueba N° 19 (baja turbiedad).

En el caso de pruebas de jarra con medianas y altas turbiedades se obtuvieron mejores resultados de porcentaje de remoción en un rango de dosis entre 60 y 70 ppm de coagulante, dichos resultados se manifiestan en las figuras 4.12, C.3 y C.4.

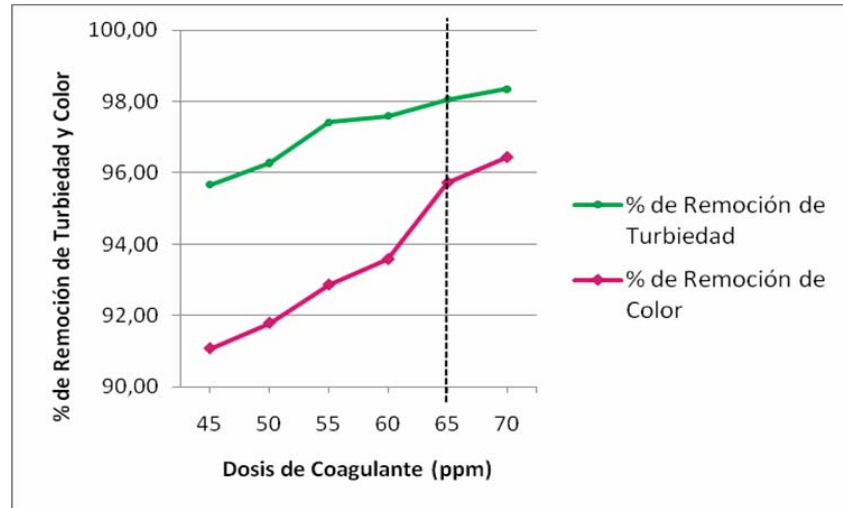


Figura 4. 12 Variación del porcentaje de remoción de turbiedad y color en la dosificación de coagulante de la prueba N° 21 (mediana-alta turbiedad).

Teóricamente se conoce que cuando la turbiedad del agua cruda es muy elevada, la cantidad de coagulante necesario es relativamente pequeña, ya que la probabilidad de colisión de las partículas es muy elevada; por el contrario, cuando la turbidez es baja, la coagulación es muy difícil de lograr (Arboleda, 1992). Aunque para este trabajo no se observó tal fenómeno, si se percibe que para las pruebas con muestras de agua cruda de mediana y alta turbiedad se obtuvo mejores resultados de porcentaje de remoción de turbiedad que alcanzan entre 94 a 98% de remoción y en el caso del color se llagan a remover entre un 90 y 96% con una dosis optima o mejorada entre 60 y 70 ppm.

Distinto es el caso de los resultados obtenidos para pruebas con bajas turbiedades mediante el uso de 40 ppm de coagulante, los porcentajes de remoción varían de un 83 a 95% para el caso de la turbiedad y entre un 70 y 89% para el color; esta divergencia entre los resultados experimentales con



lo descrito en teoría pudo deberse a la diferencia de las calidades y caudales de las pruebas, ya que la turbiedad no es el único valor que puede llegar a interferir con la reacción coagulante - muestra.

Otra observación importante dentro de la investigación es el efecto del gradiente mecánico ajustado para cada prueba; obteniéndose que tanto para bajas como para medianas y altas turbiedades del agua cruda el gradiente que produjo mejores resultados en las pruebas de jarra fue el de 2 s^{-1} como se observa en la mayoría de los ensayos ubicados en el anexo C, los porcentaje de remoción presentados en las tablas C.11 y C.24 y en la tendencia de las figuras 4.11 y 4.12 para bajas y medianas-altas turbiedades respectivamente.

Dicho gradiente en revoluciones por minuto va variando en función del caudal de alimentación ya que el mismo determina el gradiente hidráulico utilizado en cada ocasión. Este gradiente podría ser utilizado para las pruebas de jarra de emergencia, donde se desconociera las condiciones de operación y mantenimiento en que está trabajando la planta.

4.4 Influencia del gradiente mecánico en el proceso de floculación

4.4.1 Efectos del gradiente mecánico a nivel de planta

4.4.1.1 Punto de captación de muestra en sedimentadores

Un buen tratamiento de potabilización no solo viene dado por la dosis apropiada de coagulante a usar para dicho proceso, sino también en el desempeño de la planta en general. Cada etapa del proceso tiene su específica prioridad pero a medida que transcurre el tratamiento las mismas deben ser de mayor eficiencia, asegurando la calidad final del agua a tratar sin importar contratiempos en alguna de las etapas anteriores. Una de las



incertidumbres presentes en la planta La Guairita se refiere al desempeño de los sedimentadores; a pesar de ser usada en cada tratamiento la dosis óptima establecida previamente por una prueba de jarra no se logran resultados en planta similares a los reflejados en los ensayos.

Realizando pruebas de jarra con ajuste de gradiente mecánico (Tablas D.1 y D.2) para determinar la dosis mejorada a aplicar en dicho tratamiento real (Tablas D.3 hasta D.17), variando el gradiente mecánico en los floculadores en planta (Tabla 3.3 de la sección 3.4.1) y haciendo un perfil del agua sedimentada a lo largo de los sedimentadores (Tabla D.3.a hasta tabla D.17.a) se obtuvo que el mejor porcentaje de remoción de turbiedad y color se logra en el punto medio de la zona de sedimentación como se observa en las figuras 4.13, 4.14 y 4.15.

Sin importar el gradiente mecánico que se le suministre a la floculación, el resultado más frecuente obtenido por las pruebas es el mismo como se percibe desde las figuras D.1 a la figura D.12 ubicadas en el anexo D. En algunos casos existen divergencias entre ambos porcentajes de remoción, percibiéndose que mientras más longitud en el sedimentador haya recorrido la muestra, mayor será el porcentaje de remoción de color como se observa en la figura D.6.

Esto puede deberse a la segunda desinfección con cloro realizada al tratamiento, ubicada al final de la sedimentación para asegurar la misma en las redes de distribución.

A medida que va culminando el proceso de sedimentación en planta el porcentaje de remoción de turbiedad es menor y las partes por millón de aluminio residual van aumentando así se encuentren dentro de la norma de potabilización, indicando con esto una resuspensión de flóculos viejos al final del tratamiento. Esto es un grave problema que puede ser generado por las velocidades horizontales que se generan y el diseño del sedimentador.

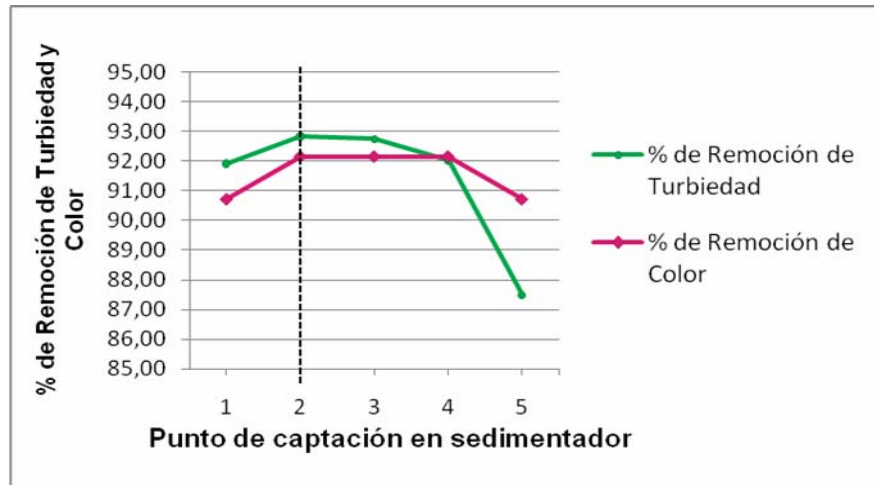


Figura 4. 13 Variación del porcentaje de remoción de color y turbiedad según el punto de captación de muestra en los sedimentadores para $G = 2 \text{ s}^{-1}$ (Prueba N° 3)

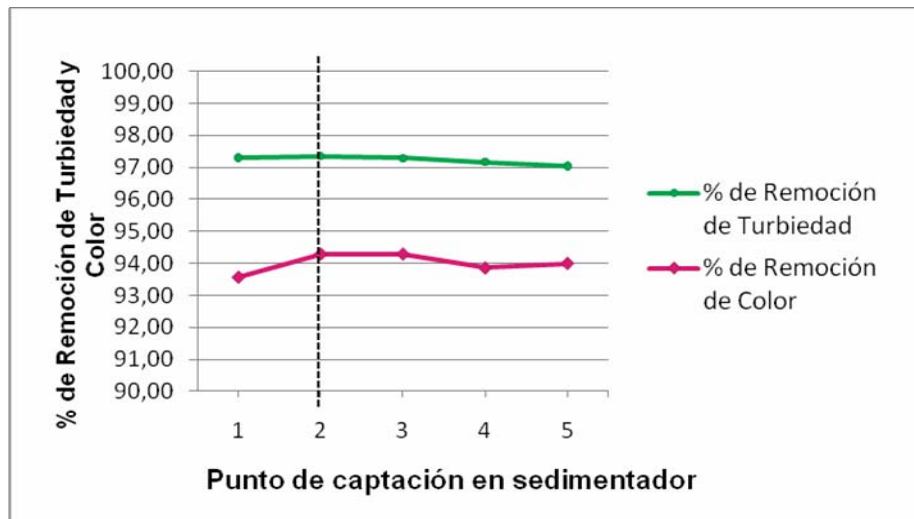


Figura 4. 14 Variación del porcentaje de remoción de color y turbiedad según el punto de captación de muestra en los sedimentadores para $G = 4 \text{ s}^{-1}$ (Prueba N° 1)

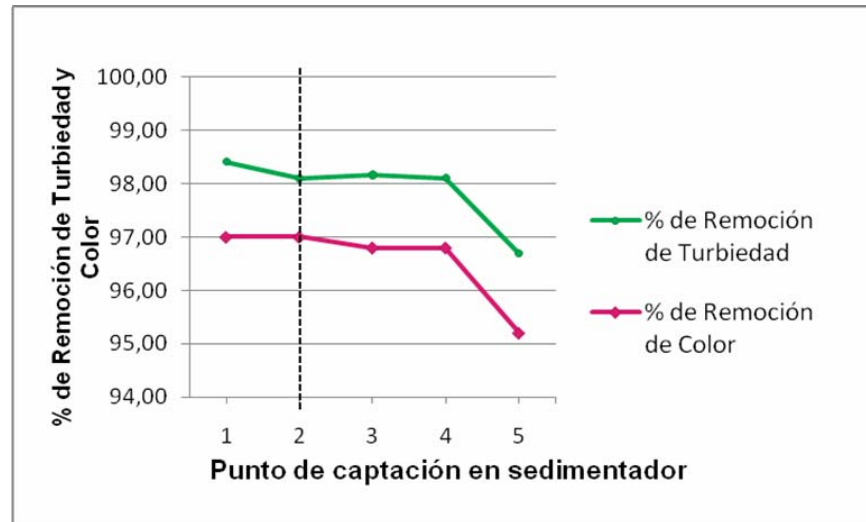


Figura 4. 15 Variación del porcentaje de remoción de color y turbiedad según el punto de captación de muestra en los sedimentadores para $G = 6 \text{ s}^{-1}$ (Prueba N° 1)

4.4.1.2 Mejor gradiente mecánico ajustable en planta

Sabiendo que el mejor punto de captación de muestra en los sedimentadores es a la mitad del mismo y teniendo conciencia real del desenvolvimiento del tratamiento en planta; se puede evaluar cual es el gradiente mecánico necesario en la etapa de floculación para obtener mejores resultados de calidad sin importar la dosis mejorada, caudal de alimentación y calidad del agua cruda a tratar.

Tomando todas las pruebas realizadas anteriormente y resaltando solo los resultados obtenidos a la mitad del sedimentador (tabla D.18) se obtiene que con un gradiente mecánico de 4 s^{-1} se logran mejores resultados de porcentaje de remoción de turbiedad y color y aluminio residual en el tratamiento; manteniéndose una consistencia de los porcentajes de remoción a pesar de utilizar caudales y calidades de agua cruda diferentes. Otro



objetivo importante en esta la investigación es lograr la similitud de los resultados obtenidos en ensayos de pruebas de jarra para una dosis mejorada específica con los obtenidos en planta; para este gradiente mecánico esta similitud coexiste a diferencia de los otros gradientes utilizados.

4.4.2 Efectos del gradiente mecánico a nivel de laboratorio

Una de las metas de la investigación es conocer si el ajuste de un gradiente extra al gradiente hidráulico aportaría una mejora al proceso y menor consumo de coagulante en el mismo, por esto luego de evaluar el comportamiento del gradiente mecánico en planta se hizo una evaluación del mismo en ensayos de prueba de jarra que permite percibir como la dosis mejorada de coagulante aumenta o disminuye de acuerdo al ajuste de la floculación mecánica.

En el caso anterior solo pudieron ser ajustados 3 gradientes diferentes a los motorreductores en planta por fallas mecánicas que existían en los mismos, pero como este caso es ideal son agregados 6 y 8 s⁻¹. Aunque estos gradientes no pueden ser ajustados de forma real, si contribuyen al estudio del comportamiento del coagulante y porcentaje de remoción en el proceso si este llegase a aumentar.

Como se observa en la serie de pruebas de jarra a diferentes gradientes y a la misma calidad de agua cruda del ensayo N° 2, resultados ubicados en el anexo D desde la tabla D.21.a a la D.21.e; a medida que el gradiente mecánico aumenta la dosis mejorada de la prueba va disminuyendo, pero solo hasta cierto punto ya que al aumentar más de 4 s⁻¹ la dosis se mantiene o aumenta de nuevo (ver serie de tablas D.19, D.21, D.22, D.24 ,D.26 y D.28)



La dosis mejorada es un valor arbitrario que solo puede ser determinado de acuerdo a la perspectiva que tenga el investigador, y dichos valores no representan exactamente con cuál de los gradientes se puede obtener una mejor remoción y una disminución en el consumo de coagulante. Por esto se tomaron los resultados de porcentaje de remoción de turbiedad y color de un mismo ensayo a la mínima dosis que puede ser utilizada para todos los gradientes.

Si se observan los resultados de remoción del ensayo N° 2 y se establece como dosis mínima presente en todas las pruebas 90 ppm (Tabla 4.13) se obtiene que el mayor porcentaje de remoción de turbiedad y color se logra con 4 s^{-1} y que al aumenta el mismo el porcentaje disminuye en dicho proceso (ver tablas D.20, D.23, D.25, D.27 y D.29).

Tabla 4. 13 Variación del porcentaje de remoción de color y turbiedad de acuerdo al gradiente mecánico ajustado en la floculación (Ensayo N° 2)

Dosis: 90 ppm		
Gradiente mecánico en paletas (s^{-1})	Porcentaje de remoción de turbiedad (%)	Porcentaje de remoción de color (%)
0	90,26	88
2	92,76	84,8
4	93,68	86
6	90,61	88
8	91,79	86



Esto afirma con mejor claridad que el gradiente mecánico de 4 s^{-1} es el más recomendable para obtener mejores resultados de remoción y una disminución en el consumo de coagulante en el proceso de potabilización, tanto a escala de laboratorio como en planta (Figura 4.16).

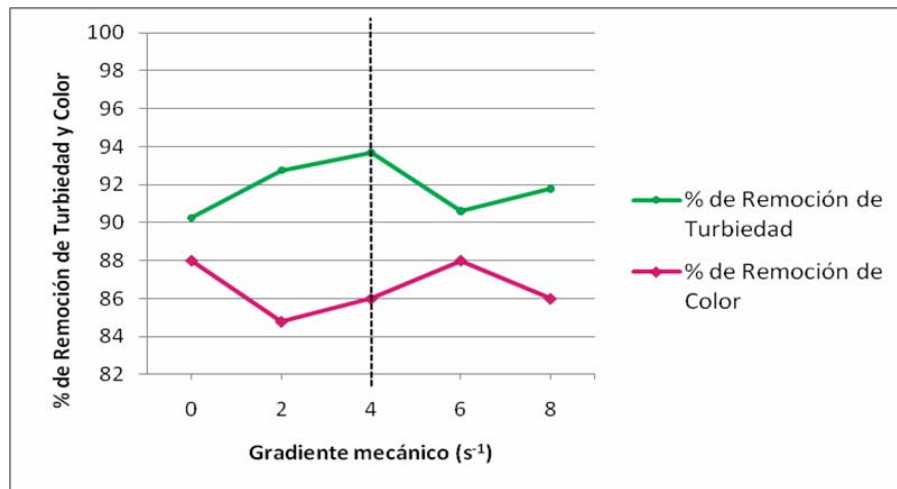


Figura 4. 16 Porcentaje de remoción de color y turbiedad de acuerdo al gradiente mecánico ajustado en la floculación para 90 ppm de coagulante (Ensayo N° 2)

4.5 Mejoras para el proceso de potabilización a nivel operacional y mantenimiento

4.5.1 Posibles consecuencias del deficiente desempeño del proceso de potabilización

El buen desempeño de un proceso de potabilización no solo viene dado del la dosis mejorada u óptima de coagulante a usar para un tratamiento; en este se involucran diferentes variantes que pueden perjudicar al proceso



como se observa en la tabla 2.3, pero al mismo tiempo llegan a presentarse otras amenazas que pueden ser manejadas y reparadas sin necesidad de asumir que dicha planta no llegara a trabajar en óptimas condiciones. Para ello se hizo una evaluación de las necesidades primordiales del proceso en las etapas de coagulación, floculación y sedimentación que llegaran a afectar los resultados de calidad final.

A continuación se enumeran los principales problemas que presenta la planta actualmente:

1. Ausencia de agitadores mecánicos en tanquilla de coagulación.
2. Trabajo deficiente de motorreductores de paletas mecánicas en la etapa de floculación.
3. Operación incorrecta de ejes de paletas mecánicas en floculación.
4. Funcionamiento inadecuado del sistema de barrelos presentes en los sedimentadores.
5. Problemas de diseño en sedimentadores horizontales.

4.5.2 Posibles soluciones para el proceso de potabilización

Para todos estos problemas existe una solución que puede llegar a ser posible y muy factible para mejorar el proceso en planta; a continuación se describen las opciones más recomendadas.

4.5.2.1 Agitadores mecánicos en tanquilla de coagulación

Como bien se sabe, el proceso de coagulación de esta planta se divide en dos partes; la primera está conformada por un sistema de tuberías y la segunda por una tanquilla de coagulación (Figura E.1). El problema de este



caso se presenta al obtener un gradiente hidráulico en el sistema de tuberías mayor que en el coagulador; pero con un tiempo de retención muy pequeño que no logra dispersar rápida y uniformemente el coagulante a través de toda la masa o flujo de agua cruda.

La solución más factible es agregar a la tanquilla de coagulación impulsores rotatorios del tipo de hélice (Figura E.2), las cuales logran generar corrientes axiales fuertes que crean gran intensidad de mezcla y se han usado para mezcla de alta velocidad con rotaciones de hasta 2000 revoluciones por minuto (Arboleda, 1992). Este tipo de impulsores lograría igualar el gradiente de mezcla que existe en el sistema de tuberías con el de la tanquilla, con la diferencia que en la misma el tiempo de retención es suficiente para una mezcla rápida.

4.5.2.2 Motorreductores en la etapa de floculación

Recordando que el sistema de floculación está integrado por baffles o tabiques que imparten un movimiento hidráulico al agua y ejes de paletas que se mueven a partir de motorreductores provocando un movimiento mecánico necesario al sistema; en la sección 4.4.1.2 de este trabajo se determinó que una de las mejores soluciones al proceso de potabilización que aumentaría la calidad del agua final y crearía una disminución en el consumo de coagulante a aplicar; es el ajuste de un gradiente mecánico de 4 s^{-1} en la etapa de floculación.

Para el cumplimiento de este es necesario la sustitución o arreglo de los motorreductores que garanticen la eficiencia de una mezcla mecánica al sistema a partir del eje de paletas. Los motorreductores en planta no pueden ser ajustados por tener viejos sistemas que a pesar de ser arreglados o sustituidos, se dañan progresivamente y no certifican el buen desenvolvimiento del proceso (Figura E.3). No obstante se sabe que no solo



es necesario de un movimiento mecánico extra en el sistema, sino de un movimiento específico; ya que este al ser muy bajo o muy alto puede generar consecuencias negativas al proceso.

4.5.2.3 Ejes de Paletas mecánicas en floculación

La planta La Guairita trabaja de forma continua durante todo el año y es indispensable el mantenimiento progresivo de las unidades operatorias de la misma. Es cierto que en el momento de hacer una parada de planta se puede observar cuales son las carencias que la misma posee, pero existen diversas unidades que deben ser evaluadas constantemente para certificar el proceso durante todo el año.

Una de ellas son los ejes de paletas en la etapa de floculación (Figura E.4); que a pesar de que el mismo ya mantiene un movimiento hidráulico es imprescindible un movimiento mecánico extra. Con evaluaciones semanales de dicho sistema se logra tener conciencia de su funcionamiento y el mismo puede ser logrado sin la necesidad de una parada completa de planta; en los momentos en que la turbiedad del agua cruda de entrada sea pequeña puede ser observado el desenvolvimiento de dichos ejes.

4.5.2.4 Sistema de barrelodos en sedimentadores

En el sistema de limpieza de los sedimentadores en planta persiste un problema de operación grave que a pesar de que ser arreglado rápidamente vuelve a recaer. Los sedimentadores de la planta La Guairita son limpiados a partir de un sistema de barrelodos mecánicos (Figura E.5) que avanza apoyado en las crestas de los muros del sedimentador, barriendo el fondo con rastras que llevan el material decantado hasta una tolva colocada al extremo del tanque donde hay una válvula automática que se abre periódicamente para extraer los sólidos acumulados.



El drenaje de la tolva hace apertura durante aproximadamente 5 a 8 minutos para descargar la mayoría de los sedimentos barridos cuando el barrelodo le indica; en muchas oportunidades este sistema de descarga no llega a funcionar, los sólidos se acumulan en la zona de lodos y con el movimiento del barrelodo se genera una resuspensión en todo el tanque ocasionando la mezcla de los sólidos con el agua ya tratada, dañándose el tratamiento por completo y sin poder evitar que el agua sea recirculada al sistema o dichos sedimentos lleguen hasta la etapa de filtración y carguen los mismos de alúmina. Existen diversos métodos de evacuación mecánica continua que pueden ser usados en sedimentadores los cuales pueden ser aplicados en la planta La Guairita; algunos de ellos son:

- **Sifones aspiradores flotantes (Clari-Vac)**

Consisten en tubos horizontales de 2 a 5 m de largo, perforados con orificios de $\frac{3}{4}$ " a 1" cada 0,15 a 0,30 m colocados de 0,10 m y 0,15 m sobre el piso del tanque y suspendidos al centro por otro tubo del mismo diámetro en forma de T invertida (4" a 6") y que sube por encima del nivel del agua hasta un canal lateral formado por un sifón, como se muestra en la figura E.6. El conjunto es hecho en aluminio liviano y va suspendido a lado y lado en flotadores. Por medio de cables movidos por un motor eléctrico, se arrastra todo el aparato de un extremo al otro del sedimentador, aspirando los lodos de fondo, los que son descargados por sifonamiento en un canal. (Arboleda, 1992).

- **Sistema de recolección de lodos (Trac-Vac)**

Son sistemas aspiradores con tubos perforados que viajan por el fondo del tanque montados sobre un carro que se desplaza impulsado por aire comprimido proveniente de un compresor que debe producir no menos de 90 lb/pulgadas cuadrada, como el que se muestra en la figura E.7. Tanto el lodo



(que se extrae por medio de una bomba o por gravedad si hay una caída de por lo menos 1,5 metros) como el aire que se inyecta se transporta con mangueras de polietileno de alta densidad. (Arboleda, 1992). Cualquiera de estos dos métodos podría llegar a ser la mejor solución para la planta, y así descartar con mayor seguridad que el problema de resuspensión en los sedimentadores no viene dado con frecuencia por problemas en el drenaje o en los barrelodos.

4.5.2.5 Diseño en sedimentadores horizontales

Uno de los mayores retos que tiene la planta La Guairita es lograr que en los sedimentadores de la misma no ocurra una resuspensión de los sólidos ya sedimentados al final; este evento se hace presente con mucha frecuencia y se desconoce cuál es su causa real. Para ello se hizo una evaluación de los factores convencionales que deben considerarse como posibles causas, ellos son:

- **Carga Superficial**

Según Azevedo Netto (1972), los flóculos de sulfato de aluminio sedimentan con una velocidad comprendida entre 0,015 y 0,070 $\frac{cm}{s}$. Por tanto podría concluirse que la carga superficial debería variar entre 13 y 60 $\frac{m^3}{m^2 \cdot d}$. Todo esto llega a variar de acuerdo a las dimensiones y al tipo de instalaciones de los sedimentadores; si se asume que la planta La Guairita mantiene instalaciones proyectadas con la nueva tecnología con operación razonable; es decir, la carga superficial debería estar entre 30 a 40 $\frac{m^3}{m^2 \cdot d}$; pero en general los países en vía de desarrollo, las plantas de tratamiento deben proyectarse para una operación precaria o apenas razonable y por



eso no se deben exceder los $45 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \times \text{d}}$ en carga superficial los sedimentadores de las mismas (Najul, 2007) (Tabla E.2).

Pero de acuerdo a los resultados obtenidos en la sección 3.5.1 esta condición no es cumplida por la planta; para un caudal promedio de 6.200 L/s la carga superficial en cada sedimentador y con solo cinco de ellos en uso es de $47,807 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \times \text{d}}$ y para seis es de $39,840 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \times \text{d}}$. Esto lo que llega a indicar que una de las mejores soluciones para la carga superficial es mantener en uso los seis sedimentadores existentes en planta o disminuir el caudal de alimentación a la misma para que dicho problema no persista cuando se requiera la operación de solo 5 decantadores. A continuación en las tablas 4.14 y 4.15 se presentan los resultados de carga superficial para cinco y seis sedimentadores en uso a diferentes líneas de operación.

Tabla 4. 14 Variación de la carga superficial con cinco (5) sedimentadores operando

Nº de líneas	Caudal (L/s)	Caudal (m ³ /d)	Carga superficial (m ³ /m ² x d)
2	3.100	53.568	23,904
3	4.600	79.488	35,470
4	5.200	89.856	40,097
5	6.400	110.592	49,350
Caudal Promedio de operación	6.200	107.136	47,807



Tabla 4. 15 Variación de la carga superficial con seis (6) sedimentadores operando

Nº de líneas	Caudal (L/s)	Caudal (m ³ /d)	Carga superficial (m ³ /m ² x d)
2	3.100	44.640	19,920
3	4.600	66.240	29,558
4	5.200	74.880	33,414
5	6.400	92.160	41,125
Caudal Promedio de operación	6.200	89.280	39,840

- **Velocidad Horizontal**

La velocidad horizontal del flujo es otro de los factores importantes que deben considerarse en el diseño indicado de un sedimentador, esta produce dos efectos opuestos (Arboleda, 1992):

- a. Ayuda a la floculación de los sólidos suspendidos dentro del decantador, promoviendo el choque entre ellos y aumentando de esta manera la proporción de partículas finas que pueden ser removidos durante la sedimentación.
- b. Arrastra y resuspende los flóculos ya sedimentados o que están por sedimentar. Por tanto, es conveniente que la velocidad horizontal sea lo bastante alta como para que se estimule la floculación pero sin que llegue a perjudicar la eficiencia del proceso de separación.



Según (Arboleda, 1992); para el flóculo de sulfato de aluminio, la velocidad horizontal óptima podría estar alrededor de 0,5 cm/s o menos como se muestra en los parámetros de diseño de los sedimentadores en la tabla E.2 del anexo E. De nuevo esta condición no se llega a cumplir dentro del diseño de los sedimentadores en planta como se observa a las tablas 4.6 y 4.7; este efecto puede deberse al sobredimensionamiento que mantienen los mismos y el porcentaje de apertura de las válvulas de entrada a la zona de sedimentación, lo que también conlleva a que la velocidad de flujo en las distintas unidades sea completamente distinta.

Tabla 4. 16 Variación de la velocidad horizontal con cinco sedimentadores operando

Nº de líneas	Caudal (L/s)	Velocidad Horizontal (cm/s)
2	3.100	0,746
3	4.600	1,107
4	5.200	1,252
5	6.400	1,540
Caudal Promedio de operación	6.200	1,492

Tabla 4. 17 Variación de la velocidad horizontal con cinco sedimentadores operando



Nº de líneas	Caudal (L/s)	Velocidad Horizontal (cm/s)
2	3.100	0,622
3	4.600	0,923
4	5.200	1,043
5	6.400	1,284
Caudal Promedio de operación	6.200	1,244

- **Zona de salida del sedimentador**

El tipo de estructura de salida determina en buena parte la mayor o menor proporción de partículas que pueden ser resuspendidas en el flujo; estas perturbaciones afectan solo la masa de agua que está al final del decantador (Najul, 2007). En el caso de la planta el diseño es uno de los más apropiados, ya que no presenta zona muerta que pueda contener cortocircuitos dentro del mismo como se muestra en la figura E. 8.

Otro caso importante es el nivel del agua en el decantador, este debe controlarse cuidadosamente; pues cuando las canaletas trabajan ahogadas el flóculo suele resuspendirse en gran cantidad por el aumento de la velocidad de salida, ya que el flujo queda controlado por los huecos de unión entre las canaletas y el canal de agua sedimentada; las canaletas de rebose se diseñan con el propósito de disminuir la carga lineal sobre ellas. Esta experiencia llega a presentarse en la planta con bastante frecuencia, esto puede deberse al cambio repentino de caudal de alimentación en la misma; pero este problema se puede llegar a resolver con un sistema de tiras



metálicas ajustables por medio de pernos en los flancos externos de cada canaleta (Figura E.10).

No es conveniente diseñar canaletas efluentes con bordes lisos como se encuentran en la planta, ya que pequeñas diferencias en la nivelación producen sectores privilegiados en la extracción del agua y no aseguran una extracción uniforme del flujo. Para ello se recomienda otro tipo de canaletas como las de “dientes de sierra” y “de orificios” como se presentan en la figura E. 11.

4.6 CONCLUSIONES

1. Para un caudal de 6.200 L/s el tiempo de retención en el sistema de tuberías es de 11,11 s y en el coagulador es de 32,62 s. Para el caso de floculadores, con cinco (5) y seis (6) unidades operando el tiempo es de 24,96 min y 29,95 min respectivamente; para los sedimentadores con cinco (5) y seis (6) unidades trabajando el tiempo corresponde a 1,77 h y 2,12 h respectivamente; cumpliendo así con los parámetros de diseño.
2. El gradiente de mezcla hidráulico para un caudal de 6.200 L/s en el sistema de tuberías es de $691,12 \text{ s}^{-1}$ y en el coagulador es $144,95 \text{ s}^{-1}$. En el caso de los floculadores con cinco (5) y seis (6) unidades trabajando es de $49,18$ y $37,41 \text{ s}^{-1}$ respectivamente.
3. El mejor tiempo de sedimentación experimental para usar en las pruebas de jarra es de 30 minutos sin importar calidad del agua cruda y caudal de alimentación. La dosis mejorada de coagulante sulfato de aluminio en estado líquido para muestras de agua cruda con baja turbiedad es de 40 ppm, para mediana – alta turbiedad la dosis está entre 60 y 70 ppm.
4. El punto medio de la zona de sedimentación resultó ser el mejor punto de captación de muestra que asemeja resultados de calidad del agua sedimentada con los obtenidos en prueba de jarra.



5. El ajuste de un gradiente mecánico de 4 s^{-1} en la etapa de floculación, es el más recomendable para obtener bajas cantidades de aluminio residual, mejores resultados de remoción en el agua y una disminución en el consumo de coagulante en el proceso de potabilización a escala de laboratorio y en planta.
6. Las principales mejoras que se deben hacer al proceso de potabilización estudiado de la planta La Guairita son: la instalación de impulsores rotatorios tipo hélice en la tanquilla de mezcla que lleguen a compensar el gradiente hidráulico existente en el sistema de tuberías de la planta, repara o sustituir motorreductores en el área de floculación y cambiar sistemas de recolección de lodos en los sedimentadores.
7. Para reducir la carga superficial en los sedimentadores es conveniente mantener en operación las seis (6) unidades de sedimentación.

4.7 RECOMENDACIONES

1. El punto de dosificación de sulfato de aluminio líquido debería ser ubicado directamente en la tanquilla de mezcla por medio de una flauta o difusor.
2. Incorporar a la tanquilla de mezcla o coagulador, mezcladores mecánicos que junto con la mezcla hidráulica pueda aportar un gradiente de aproximadamente 300 s^{-1} , valor exigido por los parámetros de diseño en la coagulación.
3. Ajustar los ensayos de prueba de jarra con los gradientes hidráulicos y tiempos de retención calculados, de acuerdo al caudal de operación que se maneje en planta a la hora de la dosificación.
4. Para obtener buenos porcentajes de remoción de turbiedad y color, dosificar el agua cruda de baja turbiedad con 40 ppm de coagulante



sulfato de aluminio líquido y para agua de mediana a alta turbiedad dosificar con 60 a 70 ppm.

5. Ajustar los motorreductores de los floculadores de planta a 0,90 revoluciones por minuto para generar un gradiente de 4 s^{-1} .
6. Para un mejor desenvolvimiento del proceso de potabilización es recomendable realizar en la planta La Guairita todas las posibles mejoras estudiadas en este proyecto.



BIBLIOGRAFIA

- Aguilar, M. J. (2009). *Influencia de los gradientes de mezcla rápida y lenta en el proceso de coagulación y floculación en la calidad del agua del efluente de la planta de tratamiento Ciudad de Caracas*. Trabajo de grado, IUTIRLA, TSU en Química Industrial, Caracas.
- American Water Works Association, Inc. (1971). *Water Quality and Treatment*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Arboleda, J. (1992). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Colombia: La asociación colombiana de ingeniería sanitaria y ambiental "ACODAL".
- Bolinaga, J. J. (1992). *Mecánica elemental de los fluidos* (Segunda ed.). Caracas: Fundación Polar. Universidad Católica Andrés Bello.
- CRANE. (1977). *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. Mexico: McGRAW- HILL.
- Degrémont. (1979). *Manual Técnico del Agua* (Cuarta Edición ed.). Degrémont.
- F. B. Leopold Company, Inc. (2004). *AsiaWaterBusiness.com*. Recuperado el 10 de Abril de 2011, de <http://www.asiawaterbusiness.com/>
- HIDROCAPITAL. (11 de Abril de 1991). *HIDROCAPITAL*. Recuperado el 18 de Mayo de 2011, de <http://www.hidrocapital.com.ve>
- Ingeniería Ambiental & Medio Ambiente. (Noviembre de 2000). Recuperado el 17 de Julio de 2010, de <http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/agua.html>
- Ingeniería Riper, C.A. (2001). *Manual de Operaciones. Gestión, operación y mantenimiento de las plantas de pretratamiento "Tuy" y de tratamiento "Ciudad de Caracas"*. Caracas.



- Lima, Y. (2000). *Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico*. SEDAPAL.
- MECALF & EDDY, INC. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, vertido y reutilización* (Tercera ed., Vol. I). Madrid: McGraw-Hill.
- MECOFLU, C.A. (1996). *Proyecto de mejoras en la planta de tratamiento La Guairita*. Informe Técnico TOMO II, HIDROCAPITAL, HIDROVEN, Caracas.
- MECOFLU, C.A. (1996). *Proyecto de mejoras en la planta de tratamiento La Guairita*. Informe Técnico TOMO I, HIDROCAPITAL, HIDROVEN, Caracas.
- METCALF & EDDY, INC. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, vertido y reutilización* (Tercera ed., Vol. II). Madrid: McGraw-Hill.
- Najul, M. (2007). *Material de Apoyo para el curso: Tratamiento básico para potabilización de aguas*. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Instituto tecnológico, Caracas.
- Ovivo (formerly Eimco Water Technologies). (1996). *Water Online*. Recuperado el 10 de Abril de 2011, de <http://www.wateronline.com/>
- Peña R, L. M. (2001). *Evaluación técnica económica del proceso de coagulación – floculación en una planta de potabilización de agua de agua*. Trabajo de grado, Universidad de Oriente, Nucleo Anzoátegui, Departamento de Ingeniería Química, Puerto La Cruz.
- Pino, M. (2003). *Evaluación de la dosificación de coagulantes y su influencia en las operaciones de coagulación y filtración en plantas de potabilización*. Trabajo de grado, Universidad de Oriente, Nucleo Anzoátegui, Departamento de Ingeniería Química, Puerto La Cruz.
- PRODOMOTICA. (2004). *G&G Ingenieros*. Recuperado el 20 de Abril de 2011, de <http://gygingenieros.blogspot.com/>



- Rojas, J. A. (2000). *Purificación del agua*. Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sanchez, C. (2009). *Evaluación del reuso del agua de las descargas de lodos provenientes de los clarificadores de la planta potabilizadora de Santa Clara (Clarines)*. Trabajo de grado , Universidad de Oriente, Nucleo Anzoátegui, Departamento de Ingeniería Química, Puerto La Cruz.
- Vargas, L. d. (2004). Tratamiento de aguas para consumo humano. *plantas de filtración rápida. Manual I: teoría, Tomo I* . Lima, Peru: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).
- Velasco, A. (2008). *Optimización de la etapa de mezcla lenta planta de tratamiento Ciudad de Caracas. La Guairita*. Trabajo de grado, E.T.I.R "JULIO CALCAÑO", Caracas.
- Veneagua. (2007). *Tratamiento de aguas residuales sanitarias*. Informe Técnico. MODULO II.



METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

TÍTULO	“Evaluación de la influencia del gradiente de mezcla en una planta de potabilización considerando la dosis mejorada, el régimen hidráulico y la calidad del agua”
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CVLAC / E MAIL
Reyes L., Karen I.	CVLAC: V-16.368.820 EMAIL: karenkirl@hotmail.com

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Agua Potable

Proceso de Potabilización

Gradiente de mezcla

Prueba de Jarras

Coagulación

Floculación

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

ÁREA	SUB ÁREA
Ingeniería y Ciencias	Ingeniería Química

RESUMEN (ABSTRACT):

Uno de los factores más importantes para el desarrollo sustentable es el abastecimiento continuo y seguro de agua potable hacia la población; este abastecimiento involucra una serie de obras y actividades integradas en un sistema, donde cada una de sus partes está interconectada entre sí, teniendo en cuenta que cualquier tipo de perturbación que llegase a interferir con una de ellas, afectaría el desempeño del proceso. Por esto en esta investigación se busca una solución a los problemas operacionales más importantes que acarrea la principal planta de potabilización de la ciudad de Caracas, la planta La Guairita. El primer paso para ello fue la obtención de los tiempos de retención y los gradientes hidráulicos con que opera la misma en sus diferentes etapas (coagulación, floculación y sedimentación) con el fin de ajustar los ensayos de laboratorio y así poder simular las condiciones reales de planta. En cada ensayo se pudo observar que con un tiempo de sedimentación de 30 minutos es suficiente para que el tratamiento ideal se asemeje al real sin importar la calidad o caudal del agua de alimentación. Al tratar diferentes mezclas de fuentes (embalses y ríos) se presentan diversas situaciones en el tratamiento de potabilización; pero se pudo observar que con la aplicación de una dosis de 60 a 70 ppm de sulfato de aluminio en estado líquido como coagulante para medianas a altas turbiedades y de 40 ppm para bajas turbiedades, se puede tratar el agua de la planta sin importar el caudal ni la situación actual a nivel de operación y mantenimiento. Se pudo demostrar que la floculación puede ser más efectiva si se anexa un gradiente mecánico de 4 s^{-1} a escala de laboratorio y planta sin importar el caudal o calidad del agua; comprobando que el tratamiento tiene un eficaz desempeño hasta un punto medio de la zona de sedimentación. En este proyecto se recomiendan diferentes mejoras a nivel de equipos y diseño de unidades que pudiesen ayudar a mejorar el desenvolvimiento de la planta en un tratamiento futuro.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****CONTRIBUIDORES:**

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E-MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU(X)
Piñango, Walmore	CVLAC:				
	e-mail:	walmore_pinango@hotmail.com			
	ROL	CA	AS	TU	JU(X)
Amundarain, Milena	CVLAC:	3.945.689			
	e-mail:	amundarain.milena@gmail.com			
	ROL	CA	AS	TU	JU(X)
Martínez, Petra	CVLAC:	4.902.046			
	e-mail:				
	ROL	CA	AS(X)	TU	JU
Cova, Alexis	CVLAC:	11.905.328			
	e-mail:	alexiscovab@gmail.com			
	ROL	CA	AS	TU	JU(X)

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2011 AÑO	06 MES	15 DÍA
---------------------------	-------------------------	-------------------------

LENGUAJE. SPA



METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS. Evaluación_gradiente.doc	Aplicación/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H
I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y
z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: Planta de Tratamiento La Guairita / Hidrocapital (OPCIONAL)

TEMPORAL: Seis meses (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Químico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería Química

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui



METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo 41 del Reglamento de Trabajo de Grado:

“Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente, y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien deberá participarlo previamente al Consejo Universitario, para su autorización.”

Karen Inmar Reyes López

AUTOR

Ing. Milena Amundaraín

TUTOR

Ing. Petra Martínez

JURADO

Ing. Alexis Cova

JURADO

POR LA SUBCOMISION DE TESIS

Ing. Yraima Salas