

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



**EVALUACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE LOS PRODUCTOS QUÍMICOS
UTILIZADOS EN UNA PLANTA DE POTABILIZACIÓN DE AGUA**

Realizado por:

ANA KARINA RIVAS MENESES

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 DOSIFICACIÓN DE LOS PRODUCTOS QUÍMICOS
UTILIZADOS EN UNA PLANTA DE POTABILIZACIÓN DE AGUA**

Asesores:

Ing. Quím. Edgar Brito
Asesor Industrial

Ing. Quím. Milena Amundarain, M.Sc
Asesor académico

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 DOSIFICACIÓN DE LOS PRODUCTOS QUÍMICOS
UTILIZADOS EN UNA PLANTA DE POTABILIZACIÓN DE AGUA**

Jurado:

Ing. Quím. Milena Amundarain, M.Sc
Asesor académico

Ing. Quím. Maritza Millán Silva, M.Sc.
Jurado principal

Ing. Quím. Yuvi Moreno, Esp.
Jurado principal

Puerto La Cruz, junio de 2011

RESOLUCION

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 lo participará al Consejo Universitario”.

DEDICATORIA

A **Dios**, por darme la fuerza necesaria para alcanzar esta meta anhelada.

A mi madre **Nellys Meneses**, por ser mi protectora, gracias por darme la vida, por ser madre y padre a la vez, por tanto cariño y amor que siempre me das y sé que nunca me faltará teniéndote a mi lado.

A mi hermana **Llysnoldis Rivas**, por su constancia y por ser la persona que junto con mi madre me brindó esa confianza y apoyo incondicional, gracias de verdad por tu disposición a colaborar conmigo siempre.

A mi hermana **Erika Rivas**, por su afecto y por estar conmigo en los momentos difíciles brindándome la energía necesaria.

A mi sobrinito **José Hurtado**, para que le sirva de ejemplo.

A mis amigas **Daniela Reyes y Kristina Mistage**, por haberme dado palabras de aliento y demostración de amor y cariño en los buenos y malos momentos, dándonos fortaleza para llegar a la meta.

AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, por estar siempre presente en mi vida, dándome su bendición día a día.

A mi madre y a mis hermanas, por estar siempre pendientes de mí y ayudarme día a día.

A mis compañeros de estudio, **Daniela, Kristina, Danilo, María José y Rilimar**, gracias por el apoyo y dedicación prestada en muchas oportunidades.

A ti **Jean**, por ser la persona que estuvo a mi lado en todo momento, me brindaste confianza y cariño, gracias por ser como eres.

A la **Universidad de Oriente** y a **los profesores del departamento de Ingeniería Química**, por darme la formación necesaria para poder cumplir con mi meta.

A **Hidrocaribe**, por permitirme cumplir con este objetivo utilizando las instalaciones de la planta de tratamiento “José Antonio Anzoátegui”.

A mi querida asesora académica la **Ing. Milena Amundarain**, por la orientación tanto personal como profesional y por la paciencia brindada en la realización de este trabajo.

A mi asesor industrial el **Ing. Edgar Brito**, por su amabilidad, colaboración e información suministrada.

A las profesoras, **Maritza Millán** y **Yuvi Moreno**, por su ayuda y buenos consejos para la realización de mi proyecto.

A la **Ing. Isabel Márquez**, por su expresiva amistad, confianza y ayuda brindada en la culminación de este trabajo de investigación.

A la **Sra. Juli**, por su extraordinario apoyo y por darme aliento para seguir luchando.

Al personal del laboratorio de Hidrocaribe, **Rómer, Jairo** y **Christian** por enseñarme y adiestrarme con sus conocimientos en la realización de los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos, además muchas gracias por todos estos momentos de apoyo incondicional.

A **María Mariño** y al **Sr. Masobio Maíz**, por siempre haberme brindado la colaboración en aquellos momentos que necesitaba sacar copia en la planta.

A todas aquellas personas que no nombré pero que de una u otra forma contribuyeron a realizar este sueño.

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como finalidad evaluar la dosificación de los productos químicos utilizados en la planta de potabilización de agua “José Antonio Anzoátegui”, mediante análisis estadísticos, en donde se aplicó distribución de frecuencia para los parámetros fisicoquímicos, obteniéndose que al comparar las características del agua producida con las normas sanitarias venezolanas de calidad del agua potable, estas se encuentran dentro de los parámetros máximos permisibles excepto el color y la turbiedad que en determinados días, presentaron valores fuera de especificaciones entre 5,13 % y 7,69 % para el color y entre 2,33 % y 12,06 % para la turbiedad, especialmente en época de lluvia y la prueba de chi-cuadrado para los análisis bacteriológicos lo que demostró que desde el punto de vista estadístico se puede tener un 95 % de seguridad de que en los meses de junio, julio y agosto el agua se comporta de igual manera tanto en el número de colonias como en los organismos coliformes totales y fecales, ya que $X_c^2 < 5,99$. De igual forma, para garantizar la potabilización del agua se realizó la demanda de cloro, en la cual después de un tiempo de contacto apropiado, se determinó la dosis requerida de cloro se encuentra comprendida entre 3,2 a 4,7 mg/l. En relación al estudio hidráulico se estudiaron los tiempos de retención de cada unidad y se determinó la dosis adecuada del coagulante y la combinación óptima de éste con el ayudante de floculación por medio de la aplicación de la prueba de jarras. En el laboratorio se constató que estos cumplen con los tiempos que se requieren en una planta potabilizadora de tipo convencional, donde los valores del proceso de coagulación, floculación y clarificación son de: 53 s, 11 min y 1,47 h respectivamente, mientras que el gradiente de velocidad en el proceso de coagulación (mezcla rápida) es de 163 rpm y en el de floculación (mezcla lenta) es 48 rpm. La dosis adecuada de coagulante resultó entre 14 mg/l y 32 mg/l y la de polielectrolito entre 0,4 mg/l y 0,8 mg/l en época de lluvia; y el porcentaje de remoción de color es de un 96,00 % a 99,39 % y de turbiedad desde un 94,18 % a 99,21 % del agua clarificada tanto en los ensayos de jarra como con las condiciones de la planta. La calidad del policloruro de aluminio de la empresa Fanacor y el hipoclorito de calcio de Industrial Tamara se encuentran dentro de los márgenes de calidad establecidas por las normas Covenin-3058 y 3664. El consumo de coagulante en época de lluvia está entre 4.779,26 mg/l hasta 10.989,26 mg/l y de cloro entre 708,04 mg/l hasta 1.349,94 mg/l, ya que es necesario dosificar juntos el policloruro de aluminio y el cloro para observar grandes cambios entre los valores de entrada y salida de color y turbiedad del agua, en cambio el de polielectrolito no sobre pasa 1 mg/l de consumo.

CONTENIDO

RESOLUCIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
RESUMEN.....	vii
CONTENIDO.....	viii
LISTA DE TABLAS.....	xii
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
CAPÍTULO 1: INTRODUCCION.....	1
1.1 RESEÑA HISTORICA DE LA PLANTA.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 ANTECEDENTES.....	5
2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE LA PLANTA CONVENCIONAL DE ESTRUCTURA MODULAR “JOSÉ ANTONIO ANZOÁTEGUI”.....	7
2.3 GENERALIDADES DEL AGUA.....	9
2.3.1 Fuentes de abastecimiento.....	9
2.3.2 Parámetros más importantes de calidad en el agua.....	10
2.3.3 Marco legal.....	13
2.4 GENERALIDADES DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO DE CLARIFICACIÓN DEL AGUA.....	14
2.4.1 Clasificación de los coagulantes.....	14
2.4.1.1 Floculantes poliméricos (polielectrólitos).....	15
2.4.2.1 Coagulantes metálicos.....	16
2.4.2 Dosis óptima de coagulantes.....	17
2.4.3 Aplicación de los productos químicos.....	17
2.4.4 Factores que afectan el proceso de coagulación-floculación.....	17
2.4.5 Clasificación de los floculadores.....	18

2.4.5.1 Floculadores hidráulicos.....	18
2.4.5.2 Floculadores mecánicos.....	19
2.4.5.3 Floculadores hidromecánicos.....	19
2.4.6 Factores que afectan el buen funcionamiento de los sedimentadores.....	19
2.4.7 Clasificación de los sedimentadores.....	19
2.4.8 Tipos de sedimentación.....	20
2.5 DESINFECCIÓN.....	21
2.5.1 Factores que influyen en la desinfección del agua.....	21
2.5.2 Cloración.....	21
2.5.3 Métodos de cloración.....	22
2.5.3.1 Cloración al cloro libre residual.....	22
2.5.3.2 Cloración al cloro libre combinado residual.....	22
2.5.4 Punto de aplicación del cloro.....	22
2.5.5 Demanda de cloro.....	23
2.5.5.1 Métodos para determinar la demanda de cloro.....	23
2.6 GRADIENTE DE VELOCIDAD.....	23
233	
2.6.1 Tiempo de retención.....	24
2.6.2 Análisis hidráulico.....	25
2.6.2.1. Pérdidas por fricción.....	25
2.6.2.2. Pérdidas por accesorios.....	25
2.6.2.3 Pérdidas por longitud de tubería.....	25
2.6.2.4. Flujo en tubería: turbulento.....	26
2.6.2.5. Pérdida por ensanchamiento súbito.....	26
2.7 PRUEBAS DE JARRA.....	27
2.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.....	27
2.8.1 Distribución de frecuencias.....	27
2.8.2 Prueba de chi-cuadrado.....	28
2.9 BALANCE DE MATERIA.....	29
CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL TRABAJO.....	30
3.1 ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS FÍSICOQUÍMICOS Y BACTERIOLÓGICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA DURANTE LA ÉPOCA DE LLUVIA EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN, A TRAVÉS DE ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.....	30

3.1.1 Análisis fisicoquímicos parciales.....	30
3.1.1.1 Aplicación de distribución de frecuencia.....	34
3.1.2 Análisis fisicoquímicos totales.....	35
3.1.3 Análisis bacteriológicos.....	39
3.1.3.1 Aplicación de la prueba chi-cuadrado.....	42
3.2 CONSTATACIÓN DE LA DEMANDA DE CLORO EN LA PLANTA DE ESTRUCTURA MODULAR QUE GARANTICE LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA.....	45
3.2.1 Procedimiento.....	45
3.2.2 Determinación de la cantidad de cloro agregado en ppm (mg/l).....	45
3.2.3 Determinación de la dosis requerida de cloro por la planta.....	47
3.3 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ADECUADA DE COAGULANTE A TRAVÉS DE UNA SIMULACIÓN QUE GARANTICE EL GRADIENTE DE VELOCIDAD OPERACIONAL EN ÉPOCA DE LLUVIA DE LA PLANTA.....	47
3.3.1 Gradiente de velocidad operación en época de lluvia de la planta	48
3.3.1.1 Mezcla rápida o coagulación	48
3.3.1.2 Mezcla lenta o floculación.....	52
3.3.1.3 Sedimentación	55
3.3.2 Determinación de la dosis adecuada de policloruro de aluminio (método de la prueba de jarra).....	56
3.3.2.1 Procedimiento	57
3.3.2.2 Selección de la dosis adecuada de policloruro de aluminio	58
3.3.2.3 Cálculo del porcentaje de remoción de color, turbiedad y pH en la unidad de sedimentación del ensayo de jarra realizado en el laboratorio.....	59
3.4 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ADECUADA DE POLIELECTROLITO QUE GARANTICE LA TURBIEDAD, COLOR, ALCALINIDAD Y pH DESEADO EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN.....	59
3.4.1 Procedimiento.....	59
3.4.2 Selección de la dosis adecuada de polielectrolito.....	61
3.4.3 Cálculo del porcentaje de remoción de color, turbiedad y pH en la unidad de sedimentación del ensayo de jarra realizado en el laboratorio y de la planta.....	61
3.5 EXAMINAR LA CALIDAD DE LOS PRODUCTOS DE TRATAMIENTO QUÍMICO EMPLEADOS EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN.....	62
3.5.1 Análisis del policloruro de aluminio.....	62
3.5.2 Análisis del hipoclorito de calcio.....	68

3.5.2.1 Procedimiento.....	68
3.6 CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE COAGULANTE, POLIELECTROLITO Y CLORO MEDIANTE LA REALIZACIÓN DE BALANCE DE MATERIA QUE SE UTILIZAN EN ÉPOCA DE LLUVIA EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN.....	70
3.6.1 Coagulante (policloruro de aluminio).....	71
3.6.2 Cloro (hipoclorito de calcio).....	71
3.6.3 Polielectrolito (Polímero).....	72
3.7.1 Equipos.....	72
3.7.2 Materiales.....	73
3.7.3 Sustancias.....	74
3.7.4 Herramientas.....	75
CAPÍTULO 4.....	76
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	76
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	76
4.1.1 Análisis fisicoquímicos.....	76
4.1.1.1 Análisis fisicoquímicos parciales.....	76
4.1.1.2. Análisis fisicoquímicos totales	87
4.1.2 Análisis bacteriológicos.....	90
4.2 CONSTATACIÓN DE LA DEMANDA DE CLORO QUE GARANTICE LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA.....	93
4.3 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ADECUADA DE COAGULANTE A TRAVÉS DE UNA SIMULACIÓN QUE GARANTICE EL GRADIENTE DE VELOCIDAD OPERACIONAL EN ÉPOCA DE LLUVIA DE LA PLANTA.....	100
4.4 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ADECUADA DE POLIELECTROLITO QUE GARANTICE LA TURBIEDAD, COLOR, ALCALINIDAD Y pH DESEADO EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN.....	106
4.5 EXAMINAR LA CALIDAD DE LOS PRODUCTOS DE TRATAMIENTO QUÍMICO EMPLEADOS EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN.....	108
4.6 CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE COAGULANTE, POLIELECTROLITO Y CLORO MEDIANTE LA REALIZACIÓN DE BALANCE DE MATERIA, QUE SE UTILIZAN EN ÉPOCA DE LLUVIA EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN.....	110
4.7 CONCLUSIONES.....	112
4.8 RECOMENDACIONES.....	113
4.9 BIBLIOGRAFIA.....	114

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Parámetros químicos de calidad del agua potable.....	13
Tabla 2.2	Parámetros físicos de calidad del agua potable	14
Tabla 2.3	Parámetros biológicos de calidad del agua potable.....	14
Tabla 2.4	Clasificación de los polielectrólitos.....	15
Tabla 2.5	Clasificación de sedimentadores según el sentido del flujo.....	20
Tabla 2.6	Tipos de sedimentación.....	20
Tabla 3.1	Datos para determinar los parámetros fisicoquímicos parciales durante el mes de junio de 2010 del agua cruda, clarificada y filtrada.....	30
Tabla 3.2	Datos para determinar los parámetros fisicoquímicos totales en el mes de junio de 2010 del agua coagulada (mezcla rápida).....	37
Tabla 3.3	Datos para determinar el número de colonias, coliformes totales y fecales del agua cruda y filtrada durante el mes de junio de 2010.....	30
Tabla 3.4	Resumen de las variables calculadas para la prueba de chi-cuadrado durante los meses de junio, julio y agosto con respecto a el número de colonias.....	44
Tabla 3.5	Datos para determinar la demanda de cloro del mes de julio de 2010.....	30
Tabla 3.6	Datos del ensayo de jarra para determinar la dosis adecuada de coagulante del día 02/08/2010.....	58
Tabla 3.7	Datos del ensayo de jarra para determinar la dosis adecuada de polielectrolito del día 02/08/2010.....	61
Tabla 3.8	Datos para determinar el porcentaje de aluminio, de cloruro y la basicidad del policloruro de aluminio suministrado por la empresa Fanacor.....	65
Tabla 3.9	Guía para tomar la cantidad de muestra para realizar la basicidad de policloruro de aluminio.....	67
Tabla 3.10	Datos para determinar el porcentaje de cloro disponible en el hipoclorito de calcio de la empresa Industrial Tamara.....	70
Tabla 4.1	Resultados de los análisis fisicoquímicos totales del agua coagulada, floculada, sedimentada y filtrada durante el mes de junio de 2010.....	75
Tabla 4.2	Resultados de los análisis fisicoquímicos totales del agua coagulada, floculada, sedimentada y filtrada durante el mes de septiembre de 2010.....	76
Tabla 4.3	Valores de las variables calculadas de la prueba de chi-cuadrado del número de colonias de los meses de junio, julio y agosto de 2010.....	91
Tabla 4.4	Valores de las variables calculadas de la prueba de chi-cuadrado de los organismos de coliformes totales de los meses de junio, julio y agosto de 2010.....	92
Tabla 4.5	Valores de las variables calculadas de la prueba de chi-cuadrado de los organismos de coliformes fecales de los meses de junio, julio y agosto de 2010.	92

Tabla 4.6 Punto de inflexión obtenido de la prueba de demanda de cloro en los meses de julio, agosto y septiembre de 2010.....	100
Tabla 4.7 Resultado de los cálculos hidráulicos en la unidad de mezcla rápida, lenta y en la sedimentación.....	75
Tabla 4.8 Dosificación adecuada de policloruro de aluminio y porcentaje de remoción de turbiedad y color del agua clarificada tanto de la planta como de la prueba de jarra.....	76
Tabla 4.9 Dosificación adecuada de policloruro de aluminio y polímero y porcentaje de remoción de turbiedad y color del agua clarificada tanto de la planta como de la prueba de jarra.....	75
Tabla 4.10 Resultado de la evaluación de la calidad del policloruro de aluminio y del hipoclorito de calcio hecha en el laboratorio de la planta José Antonio Anzoátegui.....	109
Tabla 4.11 Consumo de policloruro de aluminio, polímero y hipoclorito de calcio en la planta José Antonio Anzoátegui para diferentes dosificaciones.....	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Empresas hidrológicas prestadoras de servicios.....	1
Figura 1.2 Planta potabilizadora “José Antonio Anzoátegui”	2
Figura 2.1 Proceso de potabilización de la planta convencional de estructura modular “José Antonio Anzoátegui”	7
Figura 3.1 Equipo de medición de pH	30
Figura 3.3 Equipo de medición de conductividad	34
Figura 3.4 Balance de masa del proceso de potabilización de la planta convencional de estructura modular “José Antonio Anzoátegui”	70
Figura 4.1 Comportamiento del % pH del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de junio de 2010.	77
Figura 4.2 Comportamiento del % pH del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de julio de 2010.	77
Figura 4.3 Comportamiento del % pH del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de agosto de 2010.	77
Figura 4.4 Comportamiento del % turbiedad del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de junio de 2010.....	78
Figura 4.5 Comportamiento del % turbiedad del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de julio de 2010.	78
Figura 4.6 Comportamiento del % turbiedad del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de agosto de 2010.	79
Figura 4.7 Comportamiento del % color del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de junio de 2010.	80
Figura 4.8 Comportamiento del % color del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de julio de 2010.	80
Figura 4.9 Comportamiento del % color del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de agosto de 2010.	80
Figura 4.10 Comportamiento del % alcalinidad total del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de junio de 2010.	81
Figura 4.11 Comportamiento del % alcalinidad total del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de julio de 2010.	81
Figura 4.12 Comportamiento del % alcalinidad total del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de agosto de 2010.	82
Figura 4.13 Comportamiento del % dureza total del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de junio de 2010.	82
Figura 4.14 Comportamiento del % dureza total del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de julio de 2010.	83
Figura 4.15 Comportamiento del % dureza total del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de agosto de 2010.....	83

Figura 4.16 Comportamiento del % aluminio residual del agua filtrada con respecto a los días del mes de junio de 2010.	84
Figura 4.17 Comportamiento del % aluminio residual del agua filtrada con respecto a los días del mes de julio de 2010.	84
Figura 4.18 Comportamiento del % aluminio residual del agua filtrada con respecto a los días del mes de agosto de 2010.	84
Figura 4.19 Comportamiento del % cloro residual del agua sedimentada y filtrada con respecto a los días del mes de junio de 2010.	85
Figura 4.20 Comportamiento del % cloro residual del agua sedimentada y filtrada con respecto a los días del mes de julio de 2010.	85
Figura 4.21 Comportamiento del % cloro residual del agua sedimentada y filtrada con respecto a los días del mes de agosto de 2010.	86
Figura 4.22 Comportamiento del % conductancia específica del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de junio de 2010.	86
Figura 4.23 Comportamiento del % conductancia específica del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de julio de 2010.	87
Figura 4.24 Comportamiento del % conductancia específica del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de agosto de 2010.	87
Figura 4.25 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la primera semana (07/07/2010) del mes de julio de 2010.	93
Figura 4.26 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la segunda semana (14/07/2010) del mes de julio de 2010.	94
Figura 4.27 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la tercera semana (21/07/2010) del mes de julio de 2010.	94
Figura 4.28 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la cuarta semana (28/07/2010) del mes de julio de 2010.	95
Figura 4.29 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la primera semana (04/08/2010) del mes de agosto de 2010.	95
Figura 4.30 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la segunda semana (11/08/2010) del mes de agosto de 2010.	96
Figura 4.31 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la tercera semana (18/08/2010) del mes de agosto de 2010.	96
Figura 4.32 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la cuarta semana (25/08/2010) del mes de agosto de 2010.	97
Figura 4.33 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la primera semana (01/09/2010) del mes de septiembre de 2010.	97
Figura 4.34 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la segunda semana (08/09/2010) del mes de septiembre de 2010.	98
Figura 4.35 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la tercera semana (15/09/2010) del mes de septiembre de 2010.	98

Figura 4.36 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la cuarta semana (22/09/2010) del mes de septiembre de 2010.....	99
Figura 4.37 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la quinta semana (29/09/2010) del mes de septiembre de 2010.....	99

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 RESEÑA HISTÓRICA DE LA EMPRESA

A raíz de la descentralización del Instituto de Obras Sanitarias (INOS), se creó hace 17 años la C.A. Hidrológica de Venezuela (HIDROVEN) una empresa cuyo accionista principal es el Estado venezolano que rige en la actualidad a las 9 empresas hidrológicas nacionales y 5 descentralizadas como se observa en la figura 1.1, que atienden aproximadamente a 17 millones de habitantes, fue así como el 10 de agosto del año 1990, nació C.A. Hidrológica del Caribe (HIDROCARIBE), inscrita en el Registro Mercantil de la Circunscripción Judicial del estado Anzoátegui bajo el N° 39 Tomo A-53 de fecha 01 de noviembre de 1990.

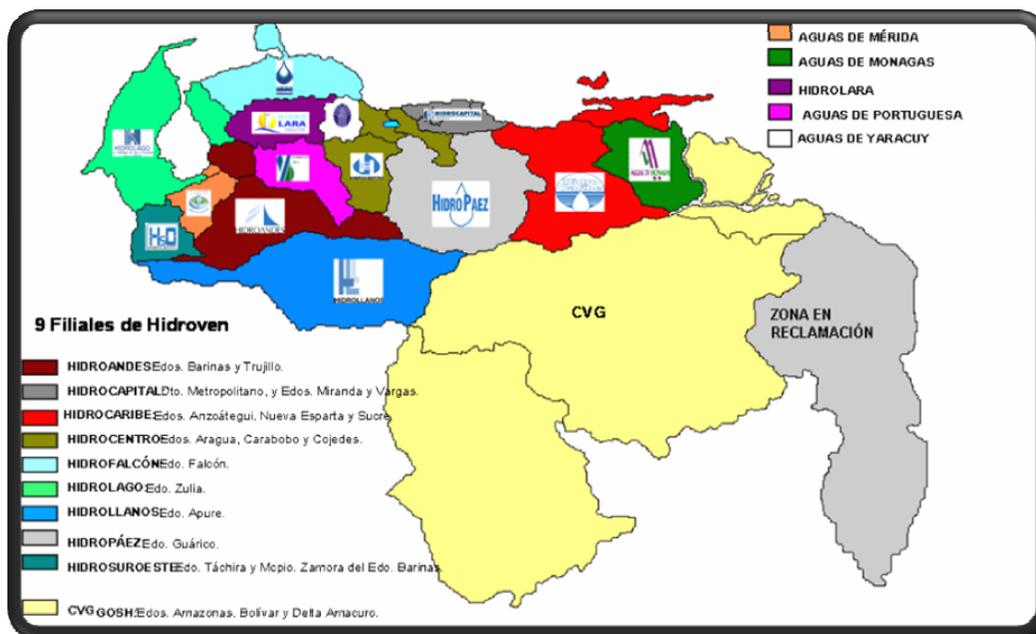


Figura 1.1 Empresas hidrológicas prestadoras de servicios

HIDROCARIBE inició sus operaciones siendo autónoma, aunque debe cumplir con las normas establecidas por la casa matriz que es HIDROVEN. Su capital inicial se estableció en 10 millones de bolívares y fue clasificada como una empresa regional de servicios públicos, tiene como jurisdicción a los estados Sucre, Anzoátegui Nueva Esparta y Monagas, aunque en este último se creó Aguas de Monagas como parte del proceso de descentralización. Lo que representa un estimado de 2.386.409 habitantes. Hidrocaribe tiene como objetivo principal prestar a sus usuarios actuales y potenciales de los estados bajo su jurisdicción un servicio continuo, oportuno, suficiente y de calidad en el

abastecimiento de agua potable y en la recolección, tratamiento y disposición de aguas servidas.

En esencia, es una empresa de servicios que cumple un fin social, dirigido a planificar, organizar, coordinar, ejecutar y controlar las estrategias del sector agua en su zona de influencia y de esa forma, lograr una eficiente administración, operación, mantenimiento y ampliación de los sistemas de agua potable y de recolección, tratamiento y disposición de aguas residuales en los estados Anzoátegui, Sucre, Monagas y Nueva Esparta.

Esta hidrológica tomó como domicilio principal la ciudad de Puerto La Cruz, en donde el Acueducto Metropolitano, forma parte del nivel operativo y es uno de los encargados de ejecutar las políticas y planes diseñados por el nivel corporativo de la empresa. El acueducto está constituido por varias plantas potabilizadoras; una de ellas es la planta José Antonio Anzoátegui que se encuentra ubicada en la zona industrial Los Montones, carretera Negra, municipio Bolívar, Barcelona y ocupa un área de 4.500 m², planta donde se realiza este trabajo de investigación, por poseer un laboratorio completo, donde se pueden llevar a cabo análisis fisicoquímicos y bacteriológicos. Está conformada por dos tipos de plantas, con tratamiento tipo convencional, una con estructura tipo modular y la otra con estructura rectangular como se observa en la figura 1.2.



Figura 1.2 Planta potabilizadora “José Antonio Anzoátegui”

La planta de estructura modular fue diseñada para procesar 600 l/s, posee dos sedimentadores de estructura circular pero actualmente procesa 350 l/s, ya que se encuentra un sedimentador fuera de servicio debido a remodelaciones y la planta de estructura rectangular que se construyó en el año 1960 empezó a operar en el año 1963, con una capacidad para procesar 950 l/s, pero actualmente procesa 1800 l/s, debido a una ampliación realizada en la salida de los filtros. Esta planta actualmente ofrece un servicio de calidad para usuarios de Barcelona, Tronconal, Fundación Mendoza, Colinas de Neverí,

Fernández Padilla, Mayorquin, Mesones, La Carpa, Cruz Verde, Viñedo, Villa Olímpica, Ponderosa, Manzana 20 y La Orquídea. Lo que representa un estimado de 414.369 habitantes.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua tal como se presenta en la naturaleza no es utilizada directamente para el consumo humano, ni industrial, porque en raros casos es suficientemente pura. En función a este problema el hombre ha construido instalaciones que involucran operaciones y procesos físicos, químicos y biológicos para adecuar el agua según sea su uso.

Por este motivo la planta de potabilización de agua “José Antonio Anzoátegui” satisface las exigencias de calidad de agua para el consumo humano en las zonas de Barcelona y parte de Lechería y Boyacá (Tronconal). Para esto, es necesario someter el agua del río Neverí que es su fuente de abastecimiento a operaciones y procesos de tratamiento para remover sólidos en suspensión y disueltos, materiales que producen color y turbidez, y destruir microorganismos potencialmente patógenos capaces de transmitir enfermedades en la población servida.

Es por ello que esta planta hidrológica, para asegurar la calidad de la potabilidad de agua, utiliza un proceso de tratamiento químico destinado a eliminar las características fisicoquímicas indeseadas a la hora de ser evaluadas como aptas para el consumo humano y aquellas características bacteriológicas que perjudican la salud pública.

La planta de potabilización antes mencionada, aplica el tratamiento tipo convencional y modular, para el cual comprende los procesos: a) mezcla rápida b) mezcla lenta o floculación, c) sedimentación, d) filtración, e) almacenamiento y f) red de distribución. La coagulación, filtración y desinfección requieren de la adición de sustancias químicas como policloruro de aluminio, hipoclorito de calcio y los ayudantes de coagulación (polímeros), respectivamente; y su aplicación depende de la cantidad del agua cruda a tratar y de sus características fisicoquímicas y bacteriológicas. La falta de especificación de dosis de las sustancias químicas a utilizar, hacen del tratamiento empleado en la planta existente, un tratamiento que genera mucha incertidumbre en cuanto a la calidad del agua a suministrar.

En función a lo expuesto anteriormente se propuso realizar una evaluación de la dosificación de los productos químicos utilizados en la potabilización del agua de dicha planta. Para ello se realizó análisis fisicoquímicos y bacteriológicos tanto de la fuente de abastecimiento como de las distintas etapas del proceso, así como también ensayos de demanda de cloro, ya que la planta actualmente presenta problemas con el cloro libre residual a mantener en la red de distribución.

Además se determinó la dosis adecuada de coagulante y polielectrolito en función del gradiente de velocidad operacional en época de lluvia del proceso, buscando mejorar las condiciones de operatividad de la planta. Y finalmente se examinaron la calidad, manejo, aspectos físicos y químicos de los productos químicos a dosificar y se calcularon las cantidades a utilizar en época de lluvia de coagulante, polielectrolito y cloro mediante la realización de balance de materia. La evaluación de la dosificación de los productos

químicos, permitió conocer las deficiencias operacionales que se presentan en la planta, a fin de que pueda proyectarse de sus resultados las soluciones más adecuadas para mejorar el proceso de control de calidad y del tratamiento químico del agua potable producto de la planta en estudio.

Con esta investigación la empresa Hidrocaribe pretende obtener datos reales que le permitan hacer los arreglos necesarios, con el fin de obtener mejoras en el actual proceso de tratamiento, ya que la turbiedad y otras características del agua han presentado variaciones a considerar y así cumplir con el objetivo de asegurar que su calidad sanitaria y fisicoquímica estén garantizadas por rigurosos controles permanentes.

Con el interés de obtener un agua tratada dentro de los parámetros establecidos por el método normalizado para el análisis de agua potable, este fue el quinto estudio de evaluación de la dosificación de los productos químicos en cuanto al mejoramiento del proceso de potabilización que se realizó en dicha planta, pero en este proyecto se consideró el gradiente de velocidad operacional en época de lluvia del proceso.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la dosificación de los productos químicos utilizados en la planta de potabilización de agua “José Antonio Anzoátegui” de Barcelona, estado Anzoátegui.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Analizar los cambios fisicoquímicos y bacteriológicos de la calidad del agua durante la época de lluvia en el proceso de potabilización, a través de análisis estadísticos.
2. Constatar la demanda de cloro que garantice la potabilización del agua.
3. Determinar la dosis adecuada de coagulante a través de una simulación que garantice el gradiente de velocidad operacional en época de lluvia de la planta.
4. Determinar la dosis adecuada de polielectrolito que garantice la turbiedad, color, alcalinidad y pH deseado en el proceso de potabilización.
5. Examinar la calidad de los productos de tratamiento químico empleados en el proceso de potabilización.
6. Calcular la cantidad de coagulante, polielectrolito y cloro mediante la realización de balance de materia, que se utilizan en época de lluvia en el proceso de potabilización.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

El agua como una sustancia constituida exclusivamente por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, en la naturaleza no se encuentra nunca en ese grado de pureza sino que está siempre acompañada con una serie de componentes inorgánicos y orgánicos. Las impurezas suspendidas y disueltas en el agua natural impiden que ésta sea adecuada para numerosos fines. Los materiales indeseables, se extraen por cada una de las operaciones unitarias y sustancias químicas que intervienen en el proceso de potabilización. Por esto las plantas potabilizadoras son de gran importancia, ya que al someter el agua cruda a sus diversos procesos la hacen apta para el consumo humano según las normas de calidad de agua potable (Kiely, 1999).

En las plantas de potabilización se utilizan sustancias químicas que intervienen en el proceso, entre los cuales se encuentran los coagulantes y floculantes, que ayudan a clarificar el agua que se somete al tratamiento, para ajustar los valores de color y turbidez, haciendo el agua potabilizada agradable a la vista y a sus estándares de calidad. Por esto HIDROCARIBE en conjunto con la casa matriz HIDROVEN, propone realizar una evaluación de la dosificación de los productos químicos utilizados en la planta de estructura modular de potabilización de agua “José Antonio Anzoátegui”.

Carpio y Ramírez (2008), realizaron una evaluación del tratamiento químico y aumento de la capacidad de la planta potabilizadora Santa Clara, ubicada en el municipio Bruzual del estado Anzoátegui. Para ello, primero identificaron la calidad del agua de abastecimiento proveniente del río Unare. Por otro lado, compararon los procesos de potabilización de las plantas Accelator tipo NS y modular. Luego, ajustaron el punto de inyección de productos químicos en la planta Accelator, reubicándolo antes del tanque repartidor. Además determinaron el costo de potabilización durante el tercer trimestre del año 2007. Finalmente, realizaron un estudio hidráulico donde se estudió el tiempo de retención, gradiente de velocidad, carga superficial y pérdidas de carga a la planta modular, ya que cuenta con una unidad modular que está fuera de uso desde 6 años.

Pino (2003), evaluó la influencia de la aplicación de coagulantes primarios en las operaciones unitarias de las plantas de potabilización El Rincón y José Antonio Anzoátegui, en donde realizó un estudio de la calidad fisicoquímica de los coagulantes, del agua tratada y dosificada con sulfato de aluminio y policloruro de aluminio, de la eficiencia de las unidades del proceso, costo y consumo de coagulantes, y como parte complementaria estudió la acción bacteriológica de estos químicos en la calidad del agua tratada. Y por último elaboró unos manuales para determinar la calidad del sulfato de aluminio y policloruro de aluminio.

Guarimata (2002), realizó la evaluación técnica y económica del uso de coagulantes y floculantes en una planta de tratamiento de aguas servidas, utilizando para ello las pruebas de jarras y la medición de los caudales de determinadas unidades del proceso, así como también la caracterización de las mismas, para estudiar el funcionamiento de éstas aplicando un balance de energía mecánica, las pruebas de jarras se llevaron a cabo utilizando los coagulantes HESSIDREX, EC2138A, ICT-1761 y los floculantes PC1192 y 9810. Después de haber realizado dichas pruebas y caracterizado las muestras antes y después de cada corrida, determinó los valores de alcalinidad, color, conductividad eléctrica, dureza, pH, sólidos suspendidos y disueltos, temperatura y turbidez.

Gómez (2002), evaluó el sistema de tratamiento de agua potable del Campamento Macagua - Central Hidroeléctrica "23 de Enero", ubicado en Puerto Ordaz, el cual tenía como finalidad verificar el correcto funcionamiento de los procesos unitarios. Primeramente realizó un estudio del comportamiento de los caudales operativos y la caracterización del agua cruda de alimentación. Por otro lado, efectuó un estudio de cada proceso de tratamiento y calculó su eficiencia. Luego, procedió a realizar demandas de cloro con el cual obtuvo la dosis adecuada de desinfección. Y finalmente determinó la dosificación óptima de sustancias químicas mediante pruebas de jarras, las cuales resultaron variables y poco controladas.

Peña (2001), realizó la evaluación técnica y económica del uso de coagulantes primarios y ayudantes de floculación en el proceso de potabilización de agua en la planta de tratamiento Ciudad de Caracas – La Guairita. Para lograr esto determinó la efectividad del coagulante primario y la combinación óptima de éste con el ayudante de floculación por medio de la aplicación de la prueba de jarras; además estudió el funcionamiento de las unidades de coagulación, floculación y sedimentación de la planta a través de la caracterización fisicoquímica del agua tanto a la entrada como a la salida de dichas unidades y de la realización de la prueba estadística de chi-cuadrado y, por último, obtuvo los costos de operación de la planta con las dosis óptimas de dichos productos considerando el costo unitario de compra de cada uno.

En esta investigación se analizó los cambios fisicoquímicos y bacteriológicos de la calidad del agua durante la época de lluvia en el proceso de potabilización, a través de análisis estadísticos como lo hecho por Peña (2001), así como también se estimó la demanda de cloro que garantizó la potabilización del agua en similitud a lo propuesto por Gómez (2002) y se determinó la dosis adecuada de coagulante y del polielectrolito de manera análoga a lo realizado por Carpio y Ramírez (2008) y finalmente se examinó la calidad de los productos químicos y se calculó la cantidad de coagulante, polielectrolito y cloro mediante la realización de balance de materia que se utilizan en época de lluvia en el proceso de potabilización como lo aplicado por Pino (2003) y Guarimata (2002). Y además se realizó el cálculo del gradiente de velocidad operacional en época de lluvia del proceso de potabilización para así mejorar la dosificación de los productos químicos.

2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE LA PLANTA CONVENCIONAL DE ESTRUCTURA MODULAR “JOSÉ ANTONIO ANZOÁTEGUI”

Esta planta de potabilización se encarga de suministrar agua a las zonas de Barcelona, Tronconal, Fundación Mendoza, Colinas de Neverí, Fernández Padilla, Mayorquin, Mesones, La Carpa, Cruz Verde, Viñedo, Villa Olímpica, Ponderosa, Manzana 20 y La Orquídea, la cual potabiliza aproximadamente 345 litros por segundo de agua que toma del río Neverí aguas arribas proveniente del canal de Caratal por gravedad, el agua cruda de este canal pasa por una filtración gruesa a través de rejillas y mallas donde quedan piedras, ramas y otras impurezas que flotas o se arrastran. Esta agua se muestra transparente a lo largo de todo el año especialmente en verano por lo cual en muchas ocasiones no necesita de la aplicación del producto químico denominado coagulante (policloruro de aluminio) que es el que actualmente se aplica en la planta.

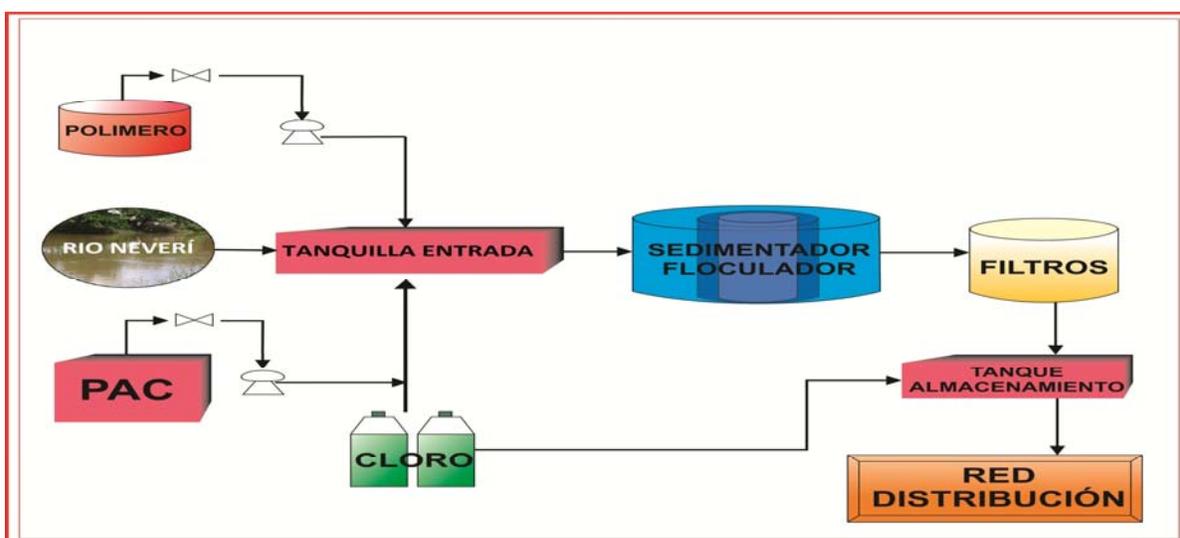


Figura 2.1 Proceso de potabilización de la planta convencional de estructura modular “José Antonio Anzoátegui”

El agua es conducida a la planta mediante una tubería en donde se dosifican los productos químicos directamente, efectuándose el proceso de coagulación al igual que la cloración (gas cloro en solución) aprovechando la turbulencia ocurrida en esta zona, según sea el caudal y características del agua cruda, es decir, la etapa de mezcla rápida se lleva a cabo dentro de este tramo de la tubería.

En esta etapa de coagulación se describe el efecto producido por la adición de uno o más compuestos químicos a una dispersión coloidal, resultando una desestabilización de las partículas, por una reducción de las fuerzas tendientes a mantenerlas separadas. Operacionalmente la coagulación se logra al agregar el producto químico apropiado que origina la formación de partículas que se adhieren por contacto entre sí llamadas coloides (Arboleda, 2000). Después de la mezcla rápida, el agua pasa al módulo interno

de la planta donde se efectúa el proceso de floculación, en el cual el floculante realiza su acción, compactándose las partículas de barro, algas y cualquier otro elemento coloidal que tenga el agua, como si fuese un imán para la formación del flóculo.

En esta etapa de floculación es donde se requiere una agitación relativamente lenta para provocar encuentros y transformar las partículas menores en agregados o flóculos. El crecimiento del flóculo es inducido por el contacto entre partículas de diámetro mayor de "1 μ " creado por el gradiente de velocidad de la masa líquida. Con el aumento de tamaño del flóculo, las fuerzas de corte pueden causar la ruptura de éste. La agregación y ruptura ocurre simultáneamente conduciendo a una única condición de distribución de tamaño de los flóculos (Arboleda, 2000). Seguidamente, el líquido pasa al módulo externo en donde se realiza el proceso de sedimentación, en el cual permanece en reposo para dar tiempo a que los lodos compactados por la adición del coagulante precipiten al fondo del tanque donde es eliminado por medio del uso de unos barrelodos.

Una vez floculada el agua, el problema radica en separar los sólidos del líquido, o sea las partículas coaguladas, del medio en el cual están suspendidas. Esto puede conseguirse dejando sedimentar los sólidos. La sedimentación es un proceso que consiste esencialmente en permitir que partículas en suspensión o estado coloidal precipiten al descender a través del agua por efecto de la gravedad, cuando esas partículas poseen un peso específico mayor que el líquido que las contiene (Arboleda, 2000).

Este fenómeno permite una eliminación muy apreciable de la turbiedad presente en las aguas, sobre todo cuando se trata de aguas provenientes de fuentes superficiales, cargadas de lodo y otras impurezas precipitables provocadas, principalmente, por los procesos de erosión en aquellas hoyas hidrográficas cuya densidad vegetativa permite que tal fenómeno se manifieste en forma apreciable (Arboleda, 2000).

En esta operación unitaria se aprovecha la fuerza de gravedad, que imprime a las partículas un movimiento descendiente, cuya velocidad depende de la densidad y viscosidad del líquido y del tamaño, forma y densidad de la partícula. Para obtener una máxima eficacia en el proceso de sedimentación conviene obtener partículas pesadas y grandes; esto se logra mediante una buena coagulación y floculación (Rigola, 1999).

Durante el proceso de decantación se originan distintas fases de sedimentación, en la parte superior del tanque se forma una superficie libre, debajo de la cual sedimentan partículas libremente y por encima de la cual hay agua limpia; más hacia el fondo aparece una zona de sedimentación retardada y en el fondo una zona de alta concentración y compactación de lodo (Rigola, 1999).

Posteriormente el agua sedimentada sale a través de unos canales por los cuales es enviada hacia los filtros, que poseen el mismo tipo de estructura, es decir modular, cuyos lechos están formados por grava números 1,2,3, arena números 1,2,3 y antracita. La filtración consiste en retener las partículas y microorganismos que hayan escapado a la acción de la sedimentación. El agua filtrada es conducida hacia el tanque de almacenamiento donde se mezcla con el agua producida por la planta de estructura rectangular y desde allí es bombeada a la redes de distribución como se observa en la figura 2.1.

2.3 GENERALIDADES DEL AGUA

2.3.1 Fuentes de abastecimiento

Hay cinco fuentes posibles de agua: aguas superficiales obtenidas de ríos, quebradas, lagos y embalses, aguas subterráneas provenientes de manantiales y pozos, recolección y almacenamiento de aguas de lluvias, desalinización de agua de mar y salobres subterráneas y recuperación de aguas residuales (Rigola, 1999):

a. Aguas superficiales: son aquellas que permanecen o corren sobre la superficie del suelo. Constituyen una de las fuentes principales de agua, especialmente para atender grandes demandas. Estas aguas exigen tratamiento para satisfacer las normas de calidad para el uso que se pretende. Entre las cuales se encuentran: ríos, quebradas, lagos y embalses, tienden a ser de calidad variable, susceptibles a los cambios estacionales, contienen baja concentración de minerales, turbiedad elevada en determinadas ocasiones especialmente al inicio y durante el período de lluvia, presentan color y eventualmente materia orgánica productora de olores y sabores, y adicionalmente están más expuestas a descargas de distintos índoles producto de las actividades humanas.

b. Aguas subterráneas: son las aguas que infiltran de las lluvias, van a estratos permeables, se almacenan en el subsuelo y pueden ser utilizadas por el hombre mediante la construcción de pozos. La calidad de estas aguas es muy uniforme y mejor calidad de las fuentes superficiales, especialmente en cuanto a calidad bacteriológicas se refiere, siempre que en las áreas de recarga del acuífero no disponga de desechos sólidos, afluentes de tanque sépticos o aguas residuales.

c. Aguas de lluvia: la recolección y almacenamiento de agua de lluvia da lugar a un recurso de excelente calidad y de cantidad apreciable en el invierno, en cierta zona de la tierra. Las impurezas que trae consigo este tipo de agua proviene del lavado de la atmósfera y están representadas por partículas suspendidas, gases solubles y vapores.

d. Desalinización de agua de mar y salobres: tiene un especial atractivo desde el punto de vista de considerar el recurso como una fuente inagotable. La desalinización es el proceso de separación de aniones y cationes de las aguas saladas.

e. Recuperación de aguas residuales: representa una fuerte competencia a la desalinización del agua de mar. Las aguas residuales de uso doméstico pueden ser tratadas por una serie de procesos tales como tratamiento convencional de lodos activados, mantenimiento de treinta días de pozos de oxidación, difusión desde la superficie a galerías subterráneas de filtración y cloradas para luego ser recicladas. El tratamiento incluye una dosis elevada de cloro para mantener la calidad bacteriológica. Con esas aguas así tratadas se han construido lagos de recreo en los que se pueden pescar, nadar y navegar, se riegan grandes parques y, además se han utilizado en industrias y fines agrícolas.

2.3.2 Parámetros más importantes de calidad en el agua

a. Parámetros físicos del agua

Son los que definen las características del agua que responden a los sentidos de la vista, del tacto, gusto y olfato como pueden ser: la turbiedad, color y conductividad (Rigola, 1999):

- **Color:** es la capacidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible. Es producido por la presencia de materiales o sustancias disueltas, es medido generalmente por comparación con un estándar arbitrario. Los compuestos orgánicos que producen color en el agua se derivan principalmente del humus de suelo, el cual se produce a su vez por descomposición de la vegetación y el ácido tánico, los cuales originan el color café amarillento como el té en las aguas superficiales.

El color en el agua es de dos tipos: el primero es el color verdadero, es aquel que está presente en el agua después de haberse removido la materia suspendida y el segundo es el color aparente, es el color verdadero más otro color que producen las sustancias en suspensión. En ciertos casos puede ser impartido color al agua por el hierro disuelto o por la descarga de desechos industriales. Lo atractivo del agua depende notablemente del color a que se haya acostumbrado el público de una determinada localidad.

- **Turbidez:** es la dificultad del agua para transmitir la luz. Debido a materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy fino, que se presentan principalmente en aguas superficiales. La turbidez es medida en NTU (unidades nefelométricas) y el agua potable posee un valor no mayor de 15 NTU. La turbidez puede ser causada por una gran variedad de materiales en suspensión, tales como arcilla, limo, sales de hierro, materia orgánica finamente dividida, el plancton y otros microorganismos, los cuales pueden variar en tamaño, desde dispersiones en estado coloidal hasta partículas relativamente grandes.

- **Conductividad:** es la medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad. Esta capacidad depende de la existencia en el agua de sales solubles, presentes en forma de iones, de la concentración total de estas sales, de su movilidad, estado de valencia y de la temperatura a la cual se hace la medición. Es indicativa de la materia ionizable total presente en el agua. El agua pura contribuye mínimamente a la conductividad y en su casi totalidad es el resultado del movimiento de los iones de las impurezas presentes.

b. Parámetros químicos del agua

Están relacionados con la capacidad del agua para disolver diversas sustancias entre los cuales podemos mencionar: el pH, dureza, alcalinidad, cloruro, sulfato, sílice, sodio, hierro, manganeso y aluminio residual (Rigola, 1999):

- **pH:** es una medida de la concentración de iones hidrógeno y su valor se obtiene a dividir la unidad, entre la concentración de iones de hidrógeno. Es una medida de la naturaleza ácida o alcalina de la solución acuosa que puede afectar a los usos específicos del agua. La mayoría de las aguas naturales tienen un pH entre 6 y 8. Los valores de pH comprendidos entre 0 y 7 corresponden a las soluciones ácidas y las

comprendidas entre 7 a 14 corresponden a las soluciones alcalinas. El valor de pH del agua es importante, por cuanto afecta el sabor, el grado de corrosividad y la eficiencia de la cloración y los métodos de tratamientos.

○ **Dureza:** es causada por la presencia en las aguas de sales disueltas del calcio y magnesio y mide la capacidad de un agua para producir incrustaciones. Afecta tanto las aguas domésticas como industriales. Las aguas naturales contienen generalmente cantidades apreciables de calcio y magnesio, el resto de los demás iones metálicos son solamente trazas. El calcio y el magnesio son los principales constituyentes de la dureza de las aguas y se les conoce con el nombre de dureza cálcica y magnésica respectivamente, y la suma de ambas se le conoce como dureza total.

La dureza en aguas naturales es quizás la característica que más contribuye al contenido mineral del agua. No existe un criterio para fijar un valor máximo de dureza en el agua de consumo humano, sólo se ha establecido que el contenido de sólidos disueltos totales no exceda de 500 ppm. Sin embargo, muchas comunidades consideran que durezas por encima de 150 ppm son objetables.

○ **Alcalinidad:** es una medida de capacidad para neutralizar ácidos. En las aguas naturales la alcalinidad se presenta usualmente en forma de carbonatos y bicarbonatos de calcio, magnesio, sodio y potasio. Dentro de límites razonables, la alcalinidad no tiene importancia sanitaria, pero es muy importante en relación con los procesos de coagulación y correctivos del poder corrosivo del agua. El conocimiento de este parámetro es esencial en el estudio de un agua, especialmente en el de su agresividad o en el de su tendencia a las incrustaciones, puesto que este fenómeno depende del equilibrio entre el ácido carbónico libre y los bicarbonatos.

○ **Cloruros:** el ion cloruro Cl^- forma sales muy solubles. Suele ir asociado al ión Na^+ y estos afectan la potabilidad del agua y su potencial uso agrícola e industrial. El agua con cloruros puede ser muy corrosiva.

○ **Sulfato:** el ion sulfato. SO_4^{2-} corresponde sales de moderadamente solubles a muy solubles. Algunos centenares de ppm perjudican la resistencia del hormigón. Se elimina por intercambio iónico.

○ **Sílice:** se encuentra en el agua disuelta como ácido silícico H_4SiO_4 y como materia coloidal; contribuye a provocar algo de alcalinidad en el agua. Las aguas naturales contienen entre 1 y 40 ppm, pudiendo llegar a las 100 ppm como SiO_2 , tiene mucha importancia en los usos industriales porque forma incrustaciones en las calderas y sistemas de refrigeración y forma depósitos insolubles sobre los álabes de las turbinas. Se elimina parcialmente por precipitación.

○ **Sodio:** el ion Na^+ corresponde a sales de solubilidad muy elevada y difícil de precipitar y suele eliminarse por intercambio iónico.

○ **Hierro:** el ion hierro se puede presentar como ion ferroso. Fe^{2+} o en la forma más oxidada del ion férrico Fe^{3+} . La presencia del hierro afecta la potabilidad del agua y en general. Forma depósito e incrustaciones. En las condiciones habituales, es decir, para un pH que varíe entre 4,5 a 9 el hierro soluble presente está generalmente en estado ferroso. Si el medio es reductor como muchas aguas subterráneas, el hierro ferroso puede alcanzar cantidades elevadas. En ausencia de complejos, el hierro férrico no es

soluble de un modo significativo más que a pH inferiores a 4,0, solamente en este caso se podrá hacer una distinción entre el hierro disuelto y el hierro en estado ferroso.

Bajo la acción del aire, o por adición de cloro, el hierro se oxida pasando al estado férrico pudiendo hidrolizarse para dar un hidróxido de hierro insoluble de color rojizo que enturbia el agua, mancha la ropa y los aparatos sanitarios, e igualmente modifica notablemente el sabor del agua, el cual puede describirse como amargo y astringente. El hierro puede estar en solución coloidal, más o menos combinado con la materia orgánica, en forma de complejos, complejos minerales o en formas de partículas en suspensión.

- o **Manganeso:** este ion actúa con 2 y 3 cargas positivas. Actúa con valencia +4 formando MnO_2 insoluble. Rara vez el agua posee más de 1 ppm de este ion.

- o **Aluminio residual:** es la cantidad que existe en el agua potable después del tratamiento con coagulante metálico en base al aluminio, tales como el sulfato de aluminio y los policloruros. Se han realizados muchos estudios de efecto del aluminio en la salud, se cuentan los del mal de Alzheimer, en las funciones renales, etc.

c. Parámetros microbiológicos del agua

La presencia de patógenos indeseables se debe a las excreciones humanas y animales. En tratamiento de aguas, el agua bruta no se analiza de forma rutinaria para bacterias, virus, etc., por razón de la gran cantidad e inmensa variedad de estos patógenos. El procedimiento analítico es utilizar organismos indicadores que confirmarán la presencia de indicadores si existen. La mayoría de los patógenos en agua se introducen en el agua a través de la contaminación fecal, y la cepa de bacterias conocida como *Escherichia coli* es un organismo indicador ideal en cuanto que tiene un largo período de supervivencia en un medio acuático. Los organismos coliformes fecales no son patógenos en sí mismos (Kiely, 1999).

Las bacterias coliformes son microorganismos de forma cilíndrica, capaces de fermentar la glucosa y la lactosa. Otros organismos utilizados como indicadores de contaminación fecal son los estreptococos fecales y los costridios. Estos últimos son organismos anaeróbicos, formadores de esporas. Las esporas son formas resistentes de las bacterias capaces de sobrevivir largo tiempo, cuya presencia en ausencia de coliformes es indicativa de una pasada contaminación. Este tipo de contaminación es más difícil de controlar que la química o física y además los tratamientos deben estar regulándose constantemente (Rigola, 1999).

Las normas internacionales para el agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 1974, establecen una diferencia entre la calidad del agua que se suministra por medio de una red de distribución y la que no se suministra en esta forma, partiendo del principio de que esta última le resulta impracticable mantener los mismos patrones de calidad que a la primera. Debe observarse también que la calidad del agua que se produce en la planta no es necesariamente la misma de la que se distribuye en la red, por cuanto pueden presentarse contaminaciones en ella (American Water Works Association, 2002).

2.3.3 Marco legal

El agua para el consumo humano debe poseer un límite máximo de los siguientes parámetros químicos, físicos y biológicos mencionados en las tablas 2.1, 2.2 y 2.3.

Tabla 2.1 Parámetros químicos de calidad del agua potable (Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 36.395, 1998)

Parámetros (mg/l)	Límite máximo permisible	Parámetros (mg/l)	Límite máximo permisible
Alcalinidad total	---	Índice de Langelier	0,0
Aluminio residual	0,2	Magnesio	120,0
Amoníaco	0,2	Manganeso	0,1
Arsénico	---	Minerales disueltos	1000,0
Cadmio	---	Nitrato (NO ₃)	45,0
Calcio	200,0	Nitrito (NO ₂)	0,03
Cloruro	300,0	Oxígeno disuelto	---
Cloro residual	0,3-1,0	pH	6,5-8,5
Cromo	0,05	Fenoles	0,001
Cobre	1,0	Selenio	0,05
Cianuro	0,01	Sílice	---
Plomo	0,1	Sulfato	500,0
Dióxido de carbono libre	---	Sólidos totales	500,0
Dureza total	500,0	Hierro total	0,3
Fluoruro	0,8	Zinc	5,0

Tabla 2.2 Parámetros físicos de calidad del agua potable (Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 36.395, 1998)

Parámetros	Límite máximo permisible
Conductancia específica a 25 °C (μS)	1500,0
Color (UC. Pt-Co)	15,0
Turbiedad (NTU)	5,0

Tabla 2.3 Parámetros biológicos de calidad del agua potable (Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 36.395, 1998)

Parámetros	Límite máximo permisible
Organismos coliformes totales	Promedio mensual menor a 1 NMP por cada 100 ml
Organismos coliformes fecales	Menor a 1 NMP por cada 100 ml

2.4 GENERALIDADES DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO DE CLARIFICACIÓN DEL AGUA

2.4.1 Clasificación de los coagulantes

Los coagulantes se pueden clasificar en dos grupos: los polielectrolitos o ayudantes de coagulación y los coagulantes metálicos. Ambos grupos básicamente actúan como polímeros además de la carga eléctrica que poseen. En los polímeros, las cadenas poliméricas están ya formadas cuando se los agrega al agua. En los segundos, la polimerización se inicia cuando se pone el coagulante en el agua, después de lo cual viene la etapa de adsorción por los coloides presentes en la fase acuosa. Es, sin embargo, necesario observar que la velocidad de sedimentación de las partículas coaguladas no depende en forma exclusiva de los coagulantes usados sino del peso de las partículas que se trata de sedimentar (Arboleda, 2000).

2.4.1.1 Floculantes poliméricos (polielectrólitos)

Un polímero puede definirse como una sustancia formada por una cantidad de unidades básicas, llamadas monómeras, unidas por enlaces covalentes que se repiten sucesivamente. Su grado de polimerización está dado por el número de monómeros que conforman su cadena polimérica. El tipo de polímeros que se forme depende de la naturaleza de los grupos funcionales que lo integran. Todos los monómeros capaces de formar polímeros deben tener por lo menos dos núcleos activos para que la macromolécula formada pueda conservar su configuración inicial. (Arboleda, 2000).

Los que se usan en plantas de tratamiento son compuestos de alto peso molecular (10^4 a 10^7) que se aplican en muy pequeñas concentraciones (0,01 a 1 mg/l) lo que compensa parcialmente su alto precio. La razón para usar bajas dosis está en la cantidad tan enorme de segmentos que ellos poseen. La poliacrilamida, con un peso molecular de 5.5×10^6 , produce 10^{13} segmentos por litro de agua con una dosis de 0,1 mg/l (Arboleda, 2000).

2.4.1.1.1 Clasificación de los polielectrólitos

Los polielectrólitos de importancia en el tratamiento de agua pueden clasificarse como se presentan en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Clasificación de los polielectrólitos (arboleda, 2000)

Según su origen	Según su carga	
Polímeros naturales	Iónicos	Catiónicos
		Aniónicos
Polímeros sintéticos	No iónicos	

- **Polímeros naturales:** son los que se producen en las reacciones bioquímicas naturales de animales y plantas, tales como proteínas, carbohidratos y polisacáridos.
- **Polímero sintético:** son compuestos orgánicos producidos por medio de la transformación química de derivados del carbón y del petróleo. Incluye la mayoría de los polímeros manufacturados por la industria y de mayor venta comercialmente. Muchos,

aunque no todos, se encuentra en forma de polvo seco. Otros son líquidos con concentraciones del 10 % al 60 % de polímeros activos.

2.4.2.1 Coagulantes metálicos

Existen una variedad de coagulantes metálicos que se pueden clasificar en tres tipos, sales de aluminio, sales de hierro y compuestos varios. Las sales de aluminio son las más utilizadas. Al utilizar sales de aluminio se forma un flóculo ligeramente pesado. Las más conocidas de éstas son el sulfato de aluminio, el sulfato de aluminio amoniacal y el cloruro de polialuminio (Arboleda, 2000).

2.4.1.2.1 Policloruro de aluminio

Es un derivado polimérico del aluminio líquido que existe desde hace años en Europa y Japón y que ahora se ha introducido también en el mercado norteamericano, como en el latino. Son complejos que tienen entre 5 a 7 veces más aluminio que el sulfato de aluminio. Los beneficios de este nuevo coagulante son: una mejor formación del flóculo, un más amplio rango de pH, menor generación de lodos y poca o ninguna necesidad de usar conjuntamente polielectrólitos. Su desventaja es que tiene mayor costo que el sulfato de aluminio o el cloruro férrico pero podría equilibrarse este costo si conjuntamente con los coagulantes metálicos, hay necesidad de usar polielectrólitos. Su rango de actuación de pH es amplio desde 5 a 10. De las experiencias obtenidas con el tratamiento del agua con este coagulantes se observa lo siguiente (Quintero, 2000):

- Los policloruros de aluminio se pueden aplicar como sustituto total del sulfato de aluminio. Pueden operar a rango altos de turbidez del agua cruda, sin perder el equilibrio del tratamiento químico.
- Son fáciles de dosificar.
- Son rentables frente a los programas tradicionales de potabilización de aguas.
- Producen rápida formación del flóculo y velocidad de sedimentación.
- El flóculo que se obtiene es resistente y compacto.
- Los policloruros son de baja generación de lodos, esto a su vez permite tratar mayor caudal de agua, pero menor frecuencia en el lavado de los filtros.
- Son de menor costo operativo.
- Disminución en costo de, al menos, un 30 % con relación al tratamiento con alumbre.
- La equivalencia de dosis teórica a peso comercial con respecto al sulfato de aluminio es de 1/2,99 para el contenido de 10 % de alúmina en el policloruro y de 1/1,67 para el contenido de 18 %.
- Se puede incrementar en al menos un 30 % la velocidad de producción de agua tratada sin necesidad de ampliar la capacidad de los sedimentadores.
- Rapidez en la respuesta. Esto permite controlar la dosificación de este producto aún a pesar de cambios bruscos en la calidad del agua cruda.
- Prácticamente no afecta el Índice de Langelier, pues hay poca o ninguna modificación del pH.
- Operación mucho más limpia y automatizada.

- Bajos residuales de aluminio, aún en dosis consideradas muy altas, según nivel de turbidez del agua cruda.

2.4.2 Dosis óptima de coagulantes

La dosis optima de coagulantes es la que produce la más rápida desestabilización de las partículas coloidales en la planta y hace que se forme un flóculo pesado y compacto que quede fácilmente retenido en los sedimentadores y no se rompa al pasar por el filtro. Debe observarse que no necesariamente el flóculo que sedimenta rápidamente es el que queda retenido en el filtro con más facilidad. El flóculo que se busca, por tanto, es aquel que da el mayor rendimiento en el conjunto de los procesos de clarificación. La dosificación se determina con base a la información sobre el caudal de entrada y la dosis óptima de coagulante que corresponda según la calidad del agua cruda que está entrando en la planta potabilizadora, la cual se obtiene mediante la prueba de jarra (Arboleda, 2000).

2.4.3 Aplicación de los productos químicos

La aplicación de los productos químicos en un proceso de clarificación puede ser un factor clave en la eficiencia de éstos. El orden de agregado puede variar de un tipo de agua a otro, así como de un sistema a otro; por lo tanto, debe verificarse en la realización de las pruebas de jarras. Un orden de agregado puede llegar a ser como los que se mencionan a continuación (Lipesa, 1998):

- **Precloración:** ayuda a oxidar materia orgánica y hierro. Permite reducir la dosis de coagulante.
- **Ayudante de coagulante:** se usa cuando el agua tiene baja turbidez, alto color, olor, etc.
- **Ajuste de pH:** cuando se quiere mejorar la efectividad del coagulante e incrementar la insolubilidad de cualquier elemento o compuesto químico. Su uso es fundamental cuando se agrega coagulantes inorgánicos primarios.
- **Polímeros coagulantes:** se agregan en un punto antes de la entrada a la zona de mezcla rápida.
- **Polímeros floculantes:** se agregan en un punto que aseguren un buen mezclado con el agua antes de entrar en la zona de mezcla lenta; en caso contrario agregarlo en ésta.

2.4.4 Factores que afectan el proceso de coagulación-floculación

Entre los factores más resaltantes que influyen en este proceso se encuentran: el pH, la alcalinidad, la temperatura, la concentración de partículas (turbiedad), concentración del coagulante, grado de agitación (gradiente de velocidad) y tiempo de retención. El pH es la variación más importante que debe considerarse en el proceso de coagulación. Se ha establecido un rango de pH para cada tipo de agua cruda, el cual produce buena coagulación y floculación en un corto tiempo con una dosis de coagulante dada. La extensión del rango de pH es afectada por el tipo de coagulante y por la composición química del agua, así como la concentración del coagulante (Arboleda, 2000).

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, reaccionarían con las moléculas de agua y se producirían ácidos fuertes que tendrían a bajar el pH. También la temperatura influye fundamentalmente en el transporte de las partículas, por su efecto en la densidad y viscosidad del agua. A mayor temperatura la probabilidad de colisiones o choque entre partículas es mayor e influyen en la posibilidad de decantación en el sedimentador (Arboleda, 2000).

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. 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 (Arboleda, 2000).

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 suficiente como para promover el encuentro entre las partículas y lograr una probabilidad de choques, así como evitar una eventual precipitación en la unidad de mezcla lenta. Se requiere un tiempo de retención adecuado para la desestabilización de las partículas coloidales, así como para la promoción de los choques que provoquen la aglomeración de las partículas coloidales. (Arboleda, 2000).

2.4.5 Clasificación de los floculadores

Según el tipo de energía para producir la agitación, los floculadores pueden clasificarse en hidráulicos, mecánicos e hidromecánicos. Los primeros, según el sentido de flujo, se clasifican en: de flujo horizontal, de flujo vertical y de flujo helicoidal. Los segundos, asimismo, según el sentido del movimiento, se clasifican en reciprocantes y rotatorios. Cabe mencionar, también, dos tipos de floculadores que tienen carácter experimental: los de piedra y los de mallas.

2.4.5.1 Floculadores hidráulicos: son conocidos con los nombres de tabiques, Alabama y Cox. Los cuales se describen a continuación (Arboleda, 2000):

- **Floculadores de tabiques:** derivan su energía para la agitación de la masa líquida, de la carga de velocidad que el flujo adquiere al escurrir por un conducto. Consisten en tanques provistos de pantallas entre los cuales el agua circula con una velocidad fija, produciendo cierta turbulencia en cada cambio de dirección del flujo. Son de flujo horizontal y flujo vertical. En los primeros, el flujo va y viene alrededor de los tabiques haciendo un giro de 180 grados al final de cada uno. En los segundos el flujo sube y baja en condiciones similares.
- **Floculador Alabama:** es una variante del anterior, cada cámara lleva un codo que impulsa el agua hacia arriba, y la vuelve a tomar en el fondo. Los codos se colocan en forma alternada: el anterior en el lado derecho de la cámara y el que le sigue en el lado

izquierdo para evitar cortocircuito. En realidad es un floculador de tipo vertical sin tabiques vertederos.

○ **Floculador de flujo helicoidal (Cox):** consiste en una serie de cámaras en las cuales el agua entra por el fondo en la esquina de la celda y sale por encima en la esquina opuesta, de forma que se introduce un movimiento rotacional del agua que crea un vórtice amplio, cuyo centro se desplaza frecuentemente de un lugar a otro propiciado así el desarrollo de los vórtices menores.

2.4.5.2 Floculadores mecánicos: son aquellos que requieren una fuente de energía externa que mueva un agitador en un tanque o en una serie de tanques, en donde el agua permanece un tiempo teórico de detención, determinado por el diseñador de la unidad, según la calidad de agua. Según el sentido del movimiento del agitador se clasifican en giratorios y reciprocantes.

2.4.5.3 Floculadores hidromecánicos: son una solución intermedia entre los floculadores mecánicos y los hidráulicos que tienen la ventaja de permitir gran flexibilidad en el cambio de gradiente de velocidad aunque no se adapta sino a ciertas configuraciones de plantas de tratamientos.

2.4.6 Factores que afectan el buen funcionamiento de los sedimentadores

En la operación de estas unidades existen factores que afectan su correcto funcionamiento, uno de los cuales se refiere a la formación de corrientes de densidad, por efectos térmicos o de concentración. Cuando la temperatura de la alimentación es mayor a la de la masa de agua contenida en el sedimentador, se forma una corriente superficial que se dirige directamente a la zona de salida, en caso contrario, la corriente se dirige al fondo provocando la resuspensión del material sedimentado; en ambos casos se disminuye el volumen efectivo del sedimentador, lo que trae como consecuencia tiempos de retención menores a los de diseño. Cuando las corrientes de densidad se deben a diferencias en la concentración, el efecto es similar pero mucho más violento (Arboleda, 2000).

El viento también produce corrientes superficiales, a veces tan intensas como para producir cambios en la dirección del flujo. En sedimentadores muy grandes incluso pueden formarse olas. Las corrientes cinéticas se producen por alteraciones en la zona de entrada, como obstrucción de los orificios o ranuras de la pantalla de entrada, lo que produce líneas de corriente con velocidades diferentes, o traslado de los gradientes de velocidades del floculador al sedimentador, también por defectos de la zona de entrada. Los desniveles en las canaletas o vertederos de salida también producen este efecto, disminuyendo el volumen útil del sedimentador. Así mismo, las obstrucciones que puedan presentarse en la zona de sedimentación, como formación de montañas de lodo por problemas en el transporte y extracción de lodos (Arboleda, 2000).

2.4.7 Clasificación de los sedimentadores: según el sentido del flujo los sedimentadores se clasifican como se presenta en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Clasificación de sedimentadores según el sentido del flujo (arboleda, 2000)

Sentido de flujo	Tipo de sedimentación	Ejemplo	Tasa de flujo m/m/d
Horizontal	1 y 2	Sedimentadores convencionales	200-420 15-45
Vertical	2 y 3	Manto de lodos	45-30
Inclinación (ascendente o descendente)	1 y 2	Decantadores con módulos o placas	120-180

2.4.8 Tipos de sedimentación

Los diferentes tipos de sedimentación pueden ser como se describen en la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Tipos de sedimentación (arboleda, 2000)

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

2.5 DESINFECCIÓN

La desinfección del agua consiste en el proceso de inactivar bacterias, virus y otros patógenos, tales como *Escherichia coli* y *Criptosporidio*, del suministro público de agua, como también de las aguas servidas que son vertidas por industrias y municipalidades en ríos, lagos u océanos. El método más común para desinfectar el agua desde los albores del siglo XX es el empleo del cloro, para obtener un agua limpia, que es por definición el agua que ha sido desinfectada de bacterias, virus y otros patógenos mediante métodos de tratamiento que no agregan nuevos peligros o riesgos. La desinfección del agua se encarga de la destrucción, o al menos de la desactivación completa, de los microorganismos dañinos presentes en el agua (Kiely, 1999).

La desinfección se puede dividir en natural y artificial. La primera se refiere a la muerte progresiva de las bacterias, producida por agentes naturales tales como la luz sola, la sedimentación, la filtración en las capas arenosas del suelo, o la estabilización de la materia orgánica que disminuye la reserva de alimento para los microorganismos. La desinfección artificial puede realizarse mediante agentes físicos o químicos. Los agentes físicos más importantes son: el calor y los rayos ultravioletas. Los agentes químicos más importantes son: los halógenos (cloro, bromo y yodo), la plata ionizada y el ozono (Arboleda, 2000).

2.5.1 Factores que influyen en la desinfección del agua

Los siguientes factores influyen en la desinfección del agua (CEPIS, 2004):

- La naturaleza y número de los organismos a ser destruidos.
- El tipo y concentración del desinfectante usado.
- La temperatura del agua a ser desinfectada: cuanta más alta sea la temperatura, más rápida es la desinfección. El tiempo de contacto: el efecto de desinfección se vuelve más completo cuando los desinfectantes permanecen más tiempo en contacto con el agua.
- La naturaleza del agua a ser desinfectada: si el agua contiene materia particulada, especialmente de naturaleza coloidal y orgánica, el proceso de desinfección es generalmente obstaculizado.
- El pH (acidez/alcalinidad) del agua.
- Mezcla: una buena mezcla asegura la adecuada dispersión del desinfectante a través de toda el agua y así, promueve el proceso de desinfección.

2.5.2 Cloración

La cloración es el proceso de desinfección que hasta el presente reúne las mayores ventajas: es eficiente, fácil de aplicar y deja efecto residual que se puede medir por sistemas muy simples y al alcance de todos. Tiene, en cambio, la desventaja de ser corrosivo y especialmente, en algunos casos, formar subproductos posiblemente peligrosos para la salud y producir sabor desagradable en el agua (Arboleda, 2000).

El cloro puede aplicarse también utilizando algunas de sus sales. Las más conocidas de estas son el hipoclorito de sodio y el hipoclorito de calcio que se expenden en polvo o en solución con concentraciones entre 12 y 70%. El cloro y los hipocloritos producen reacciones similares en el agua y su eficiencia bactericida es idéntica. La única diferencia es que el cloro baja el pH y el hipoclorito lo sube ligeramente. El cloro se emplea principalmente en plantas medianas y grandes. El hipoclorito en plantas pequeñas, piscinas y pozos, pues los hipocloradores son más sencillos de manejar (Arboleda, 2000).

2.5.3 Métodos de cloración

La desinfección sólo puede controlarse de forma perfecta mediante análisis bacteriológicos. Sin embargo, deben efectuarse frecuentemente determinaciones de cloro residual, siendo conveniente utilizar un método de análisis que permita determinar el contenido de cloro libre y en cloro combinado (Arboleda, 2000):

2.5.3.1 Cloración al cloro libre residual: es la aplicación de cloro al agua para producir directamente un residual de cloro libre disponible y mantener este residual en parte de la planta de tratamiento o del sistema de distribución. La cloración al cloro libre residual, de agua sin amoníaco, requiere la adición de suficiente cloro para satisfacer la demanda de los agentes presentes, más el necesario para dejar el residual deseado de cloro libre disponible.

2.5.3.2 Cloración al cloro libre combinado residual: es la aplicación de cloro al agua para producir con el amoníaco natural o añadido, un residual de cloro combinado disponible, para mantenerlo en su totalidad o en una parte de la planta de tratamiento o del sistema de distribución.

2.5.4 Punto de aplicación del cloro

La selección del punto de aplicación es de bastante importancia. Ya sea que se haga precloración o poscloración, el punto que se seleccione para inyectar el cloro debe ser tal que éste no se segregue dentro de la masa líquida y pueda distribuirse con gran rapidez dentro de ella. Si hay pre y poscloración los puntos más obvios para la aplicación del cloro es en el canal o tubo de llegada del agua cruda y en efluentes general de los filtros, antes del tanque de almacenamiento y antes de la alcalinización, con el objeto de evitar clorar a pH altos a los que se forma preferentemente el ión hipoclorito que es mucho menos eficiente que el ácido hipocloroso (Arboleda, 2000).

En ocasiones no es conveniente clorar a la entrada del agua cruda en especial cuando esta tiene alto color. En estos casos puede trasladarse la precloración al final de la sedimentación cuando buena parte del color ha sido removido o cambiar la cloración por la cloraminación. Esta última solución se utiliza cuando se presenta gran producción de algas en floculadores y decantadores (Arboleda, 2000).

2.5.5 Demanda de cloro

En la medida en que los procesos de destrucción y oxidación avanzan se va consumiendo cloro, dependiendo de la cantidad de materia oxidable presente en el agua. Esta cantidad es llamada demanda de cloro y se define como la diferencia entre la cantidad de cloro adicionado al agua y la cantidad de cloro total disponible que permanece después de un tiempo determinado. También se dice que es la cantidad de cloro que se consume en las reacciones de oxidación con compuestos orgánicos e inorgánicos tales como hierro, manganeso, fenoles, amoníaco, aminoácidos, proteínas y carbohidratos (Lipesa, 1998).

La cantidad de cloro necesaria para obtener un residual determinado, después de un tiempo de contacto específico, es un parámetro muy importante en el diseño de plantas de purificación y tratamiento de agua, donde en la práctica moderna de cloración, tiene gran importancia específica la naturaleza del cloro residual, que puede estar presente en forma de cloro libre o combinado (Lipesa, 1998).

2.5.5.1 Métodos para determinar la demanda de cloro

La desinfección puede controlarse de forma perfecta mediante análisis bacteriológicos. Sin embargo, deben efectuarse frecuentes determinaciones de cloro residual, siendo conveniente utilizar un método de análisis que permita determinar el contenido en cloro libre y en cloro combinado. La demanda y el requerimiento de oxidante están significativamente afectados por las características fisicoquímicas de la muestra y por la forma en que se mida el consumo del mismo. La demanda de cloro puede aplicarse a aguas cloradas y aguas naturales para evaluar requerimientos para su desinfección, y los métodos para determinarla se dividen en (CEPIS, 2004):

- **Método de laboratorio:** establece las normas de procedimiento para la determinación de la demanda de cloro; no obstante, debido a la dependencia de ésta de diversos factores, el analista deberá definir las condiciones experimentales, tales como el tiempo de contacto, el pH y la temperatura, bajo las cuales se hizo la determinación.
- **Método de campo:** se utiliza para la determinación de cloro residual o disponible y puede ser utilizado en las plantas o en el campo cuando no hay facilidades de laboratorio y personal disponible para la aplicación de métodos más exactos. Los resultados son sólo aproximados.

2.6 GRADIENTE DE VELOCIDAD

Tanto la efectividad de la mezcla como la floculación dependen de dos parámetros. El tiempo de retención y la energía disipada dentro de la masa de agua. Cuando se hace girar un agitador en una cámara con agua, la velocidad en el sentido del flujo no es igual en cada punto, sino que varía en forma continua en la sección transversal del tanque lo que crea un gradiente, el cual se puede expresar como dv/dy (diferencia de velocidad en una distancia dada). De acuerdo a la expresión de Camp y Stein el gradiente de velocidad se expresa de la siguiente forma (Arboleda, 2000):

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu}} \quad (\text{Ec.2.1})$$

donde:

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

P = potencia disipada (Wattios).

μ = viscosidad absoluta (Pa.s).

Para poder calcular el gradiente de velocidad es necesario obtener el valor de la potencia unitaria, la cual viene dada por la siguiente expresión (Arboleda, 2000):

$$P = \frac{\rho \times g \times h_f}{Tr} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

donde:

ρ = densidad del fluido (kg/m^3).

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

h_f = pérdidas de fricción (m).

Tr = tiempo de retención (s).

Sustituyendo la ecuación 2.2 en la ecuación 2.1, se tiene la siguiente expresión de gradiente de velocidad:

$$G = \sqrt{\frac{\rho \times g \times h_f}{\mu \times Tr}} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

2.6.1 Tiempo de retención

El tiempo de retención es el tiempo que debe transcurrir para que el agua pase a través de una determinada unidad, basándose en el gasto y en el volumen del tanque, suponiendo un desplazamiento total y un flujo uniforme a través del tanque. Se calcula dividiendo el volumen útil del recipiente entre el gasto que pasa por él (Arboleda, 2000):

$$Tr = \frac{V}{Q} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

donde:

V = volumen de la unidad (m^3).

Q = caudal (m^3/s).

2.6.2 Análisis hidráulico

2.6.2.1. Pérdidas por fricción

Las pérdidas por fricción en un sistema de tuberías es un parámetro que interviene en los cálculos de las pérdidas a la entrada y salida del recipiente, válvulas, equipos y accesorios. A medida que un fluido fluye por un conducto, tubo o algún otro dispositivo, ocurren pérdidas de energía debido a la fricción que hay entre el líquido y la pared de la tubería; las pérdidas totales por fricción vienen dadas por la siguiente ecuación (Crane, 1992):

$$h_f = h_L + h_v \quad (\text{Ec. 2.5})$$

donde:

h_L = pérdidas por longitud de tubería (m).

h_v = pérdidas por accesorios (m).

2.6.2.2. Pérdidas por accesorios

Las pérdidas menores o secundarias son aquellas producidas por los accesorios que necesariamente se deben de colocar en las tuberías, para que éstas puedan realizar funciones específicas, tales como: desviaciones en 90 y 45°, corte de flujo, regulación de presión o caudal (válvulas de regulación, placas orificio, etc.), purificación del fluido (filtros, retenedores, etc.), división de flujos, entre otros. Las pérdidas por accesorios se calculan a partir de la siguiente ecuación (Crane, 1992):

$$h_v = K_t \frac{v^2}{2 \times g} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

donde:

K_t = coeficiente de resistencia.

v = velocidad media del flujo (m/s).

El coeficiente de resistencia (K) relaciona las pérdidas por accesorios que existen en la tubería, cada accesorio tiene un K determinado que depende del factor de fricción. Algunas relaciones para el cálculo de K en diferentes accesorios se presentan en las tablas A.6, A.8 y A.9. El valor de K será la sumatoria de los K de los distintos accesorios (Crane, 1992).

2.6.2.3 Pérdidas por longitud de tubería

Las pérdidas pueden ser continuas, a lo largo de conductos regulares, accidentales o localizadas, debido a circunstancias particulares. Las pérdidas de carga lineales se obtienen con la expresión de Darcy Weisbach, habitualmente las pérdidas de carga de las tuberías se miden en metros de columna de líquidos y se dan en metros de tuberías (Crane, 1992):

$$h_L = f \times \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2 \times g} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

donde:

L = longitud de tramo (m).

D = diámetro (m).

f = factor de fricción.

2.6.2.4. Flujo en tubería: turbulento

El régimen de flujo existente depende del diámetro de la tubería, de la densidad y la viscosidad del fluido y de la velocidad del flujo. Luego, el régimen de flujo se caracteriza por el número de Reynolds, término adimensional que relaciona las fuerzas dinámicas de la masa del fluido respecto a los esfuerzos de deformación ocasionados por la viscosidad (Crane, 1992).

$$R_e = \frac{D \times V \times \rho}{\mu} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

donde:

D = diámetro interno [m].

Usualmente, el flujo en tuberías se considera como laminar si el número de Reynolds es menor que 2.100 y turbulento si es superior a 4.000. Entre estos dos valores está la zona denominada zona crítica en donde el régimen de flujo es impredecible, pudiendo ser laminar, turbulento o de transición, dependiendo de muchas condiciones con posibilidad de variación (Crane, 1992).

2.6.2.5. Pérdida por ensanchamiento súbito

En ciertas conducciones es necesario cambiar la sección de la tubería y pasar a un diámetro mayor, debido a que el diámetro de la tubería es menor al diámetro del floculador se presenta una pérdida por ensanchamiento súbito, lo que significa que toda la energía cinética del fluido se disipa en forma de energía térmica la cual se calcula a partir de la formula de Borda (Merritt, 1984):

$$h_e = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2 \times g} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

donde:

h_e = pérdida por ensanchamiento (m).

V_1 = velocidad antes del ensanchamiento (m/s).

V_2 = velocidad después del ensanchamiento (m/s).

2.7 PRUEBAS DE JARRA

Estas pruebas se emplean en la evaluación de un tratamiento aplicado para disminuir los sólidos suspendidos y otras materias no sedimentables, por medio de una coagulación-floculación seguida de una sedimentación por gravedad. La prueba consiste en simular la clarificación y operación en un equipo que contiene 6 jarras (beaker) de 1000 ml con sus respectivos agitadores como se puede apreciar en la figura 2.2. En la prueba se comparan las múltiples combinaciones químicas que están expuestas a las mismas condiciones hidráulicas (los efectos de la intensidad del mezclado rápido y lento así como la duración de éstos) (Lipesa, 1998).



Figura 2.2 Equipo de prueba de jarra

En la prueba de jarra se determina en programa químico óptimo en cuanto al tipo de coagulante y floculante, dosis y orden de agregado, así como también el pH, tamaño de flóculo, características de su sedimentación, tiempo de formación del flóculo, claridad final del agua y simulación de la recirculación de lodo si es necesario. (Lipesa, 1998).

2.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

2.8.1 Distribución de frecuencias

Uno de los primeros pasos que se realizan en cualquier estudio estadístico es la tabulación de resultados, es decir, recoger la información de la muestra resumida en una tabla, que se denomina distribución de frecuencias, en la que cada valor de la variable se le asocian determinados números que representan el número de veces que ha aparecido, su proporción con respecto a otros valores de la variable, etc. Por lo tanto, se llama distribución de frecuencias a un agrupamiento de datos en clases acompañada de sus frecuencias: frecuencias absolutas, frecuencias relativa o frecuencia porcentuales. En caso de que las variables estén al menos en escala ordinal aparecen opcionalmente las frecuencias acumuladas absolutas, y frecuencias acumuladas porcentuales (Cermeño, 1992).

2.8.2 Prueba de chi-cuadrado

Esta prueba permite determinar las desviaciones entre las frecuencias observadas y las frecuencias esperadas, existen dos casos, en el primero de ellos se hace una proposición respecto a uno o varios parámetros, y lo que el investigador hace a través de la prueba de hipótesis es proponer dos hipótesis, una llamada nula (H_0) en la que se establece que la muestra procede de una distribución teórica especificada y la otra llamada opcional (H_1) en la que se establece lo contrario para un nivel de significancia o valor de certeza dado que puede ser de 0,05 o 0,01 lo cual en el primer caso implica que el investigador tiene un 95% de seguridad para generalizar sin equivocarse, en términos de probabilidad, 0,95 y 0,05 respectivamente, ambos suman la unidad (Cermeño, 1992).

El segundo caso implica que el investigador tiene 99% en su favor para generalizar sin temor y 1% en contra (0,99 y 0,01 = 1,00). De esta manera si la H_0 es congruente con los datos de la muestra, ésta se acepta con un valor aceptable del parámetro y la H_1 se rechaza, pero si sucede lo contrario entonces se acepta H_1 y se rechaza el H_0 . Esta prueba se determina mediante la siguiente ecuación (Cermeño, 1992):

$$X^2 = \sum \frac{(O_i - E)^2}{E} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

donde:

X^2 = valor calculado de la prueba para la muestra con f grados de libertad.

n = número de grupos a estudiar.

O_i = porcentaje de frecuencia observado para el grupo i .

E = porcentaje de frecuencia esperado para cada grupo, con base en la distribución preconcebida.

f = grados de libertad para la prueba. En general, esto será igual a $(n-1)$ menos el número de parámetro o cantidades estadísticas en las que se basan el E .

El porcentaje de frecuencia observado para un grupo dado (O_i) se halla de la siguiente manera (Cermeño, 1992):

$$O_i = \frac{\text{FrecObsGrupo}_i}{\sum_{i=1}^n \text{FrecObsGrupo}_i} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

donde:

Frec Obs Grupo i = frecuencia observada del grupo i

El porcentaje de frecuencia esperado para el grupo i (E_i) se halla de la siguiente manera (Cermeño, 1992):

$$E = \frac{N}{n} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

donde:

N = sumatoria de los porcentajes de frecuencia observado de cada grupo estudiado.

Se establece la prueba de hipótesis de la siguiente manera:

1. H_0 : la muestra procede de la distribución teórica especificada.
 H_1 : la muestra no procede de la distribución teórica especificada.
2. Para un nivel de significancia (α):
Acéptese H_0 si X^2 calculado $<$ X^2 tabulado.
Rechácese H_0 si X^2 calculado $>$ X^2 tabulado.

2.9 BALANCE DE MATERIA

El balance de materia es un método matemático que se basa en la ley de conservación de la materia, que establece que la masa de un sistema cerrado permanece siempre constante (excluyendo, por supuesto, las reacciones nucleares o atómicas y la materia cuya velocidad se aproxima a la velocidad de la luz). La masa que entra en un sistema debe, por lo tanto, salir del sistema o acumularse dentro de él, por lo tanto de no existir acumulación o consumo de materia dentro del sistema, se dice el proceso está en estado estacionario o uniforme, es decir (Himmelblau, 1988):

$$\text{ENTRADA} = \text{SALIDA} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Los balances de materia se desarrollan comúnmente para la masa total que cruza los límites de un sistema. También pueden enfocarse a un elemento o compuesto químico. Cuando se escriben balances de materia para compuestos específicos en lugar de la masa total del sistema, se introduce un término de generación (Himmelblau, 1988):

$$\text{ENTRADA} + \text{GENERACIÓN} = \text{SALIDA} + \text{CONSUMO} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

El término de generación puede utilizarse para describir velocidades de reacción y puede ser tanto positivo como negativo. Un balance de materia no es otra cosa que un conteo del flujo y cambio de masa en el inventario de materiales de un sistema. Los balances de materia se pueden aplicar a una amplia variedad de materiales, a muchas escalas de tamaño del sistema y a varios grados de complejidad, estos a su vez pueden clasificarse de la siguiente forma (Himmelblau, 1988):

- Balance de masa global o total: se realiza en todo el sistema, considerando las masas totales de cada una de las corrientes de materiales.
- Balance parcial: se realiza en los subsistemas, considerando un determinado componente en cada una de las corrientes.
- Balance molar: si en el sistema no se originan cambios químicos.
- Balance atómico: si en el sistema hay cambios químicos.

CAPÍTULO 3 DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1 ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS FISICOQUÍMICOS Y BACTERIOLÓGICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA DURANTE LA ÉPOCA DE LLUVIA EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN, A TRAVÉS DE ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Para el logro de este objetivo se emplearon los procedimientos establecidos en los Métodos Estándar (APHA, AWWA y WPCF, 1998), para hacer los análisis fisicoquímicos parciales diarios y los fisicoquímicos completos bimensuales. Así como también bacteriológicos diarios para denotar la cantidad y tipos de coliformes presentes. Posteriormente, con los resultados obtenidos se realizaron análisis estadísticos, en donde se aplicó distribución de frecuencias para los análisis fisicoquímicos y la prueba de chi-cuadrado para los bacteriológicos. Estos análisis se llevaron a cabo en el laboratorio de aguas de la planta José Antonio Anzoátegui, bajo la supervisión de los técnicos químicos que allí laboran.

3.1.1 Análisis fisicoquímicos parciales

Para la determinación de los análisis fisicoquímicos parciales del agua cruda (entrada a la planta), clarificada y filtrada, se recopilaron datos de pH, turbidez, color, alcalinidad total, dureza total, aluminio residual, y conductividad específica correspondientes a sesenta y seis días de análisis.

○ **pH (método AWWA 4500pH-B):** esta medida se hace utilizando un medidor de pH que consta de un electrodo de vidrio como se observa en la figura 3.1. Este instrumento se calibra a pH 7 con solución buffer al pH respectivo. Para la medición de esta variable se toman 50 ml de la muestra a medir, la cual se agita suavemente y se le introduce el electrodo de vidrio; transcurrido 1 minuto se lee el valor del pH en la escala del instrumento para el agua cruda, clarificada y filtrada, los cuales se encuentran reportados para en las tablas 3.1, A.1 y A.2.



Figura 3.1 Equipo de medición de pH

Tabla 3.1 Datos para determinar los parámetros fisicoquímicos parciales durante el mes de junio de 2010 del agua cruda, clarificada y filtrada

Dia	pH.			Turbiedad (NTU)			Color (UC. Pt-Co)					Alcalinidad total (ml. de H ₂ SO ₄)			Dureza total (ml. de EDTA)		Aluminio residual (mg/l Al)	Cloro residual (mg/l Cl ₂)		Conductancia (µS)	
	Cr.	Sed.	Filt.	Cr.	Sed.	Filt.	Cr.			Sed.	Filt.	Cr.	Sed.	Filt.	Cr.	Filt.	Filt.	Sed.	Filt.	Cr.	Filt.
							Vt.	Vm.	Crd.												
1	7,55	7,22	7,37	111	30	10	50	5	25	50	10	4,2	4,3	4,4	7,0	6,0	0,004	1,2	0,1	324	308
2	7,82	7,77	7,87	218	37	11	50	5	50	40	15	4,4	4,2	4,2	6,9	6,0	0,006	1,0	0,5	251	250
3	7,74	7,71	7,32	102	59	25	50	5	25	30	20	4,5	4,7	4,7	6,5	6,5	0,018	0,6	0,2	334	333
4	7,78	7,69	7,40	198	52	12	50	5	30	40	30	4,8	4,9	4,8	6,6	6,4	0,010	0,7	0,4	311	302
7	7,92	7,72	7,58	158	24	7	50	5	25	50	25	4,8	4,8	4,4	6,4	6,4	0,018	1,1	0,5	318	306
8	7,81	6,97	7,05	173	26	18	50	5	23	30	20	4,6	4,2	4,4	6,4	6,2	0,012	0,9	0,4	313	310
9	7,91	6,92	7,19	115	10	4	50	5	20	30	20	4,4	4,1	4,1	6,4	6,0	0,011	0,7	0,3	222	231
10	7,71	7,26	7,41	150	14	5	50	5	20	20	10	4,6	4,1	4,0	6,5	6,0	0,011	2,2	0,6	230	245
11	7,97	7,16	7,37	173	14	3	50	5	70	50	10	4,5	4,1	4,1	6,4	6,2	0,006	0,6	0,2	292	311
14	8,12	7,77	7,81	339	34	4	50	5	25	30	10	4,5	4,3	4,4	6,4	6,1	0,009	0,7	0,1	298	316
15	7,58	7,74	7,79	185	79	28	50	5	25	30	20	4,5	4,4	4,5	6,6	6,2	0,016	1,1	0,4	301	320
16	7,74	7,69	7,74	144	81	19	50	5	25	50	20	4,8	4,6	4,6	6,6	6,5	0,010	0,6	0,3	322	318
17	7,88	7,78	7,71	146	20	7	50	5	25	30	20	4,7	4,7	4,5	6,5	6,9	0,018	0,7	0,2	311	329
18	8,19	7,33	7,41	145	37	16	50	5	25	50	20	4,7	4,4	4,4	6,9	6,9	0,012	1,1	0,5	314	333
21	7,86	7,35	7,18	101	33	14	50	5	24	30	20	4,0	4,2	4,2	6,9	5,3	0,011	0,7	0,4	237	350
22	7,52	6,88	7,63	160	20	6	50	5	25	50	20	4,3	3,7	3,8	5,3	5,9	0,014	0,8	0,2	263	276
23	7,49	7,12	7,05	156	61	31	50	5	24	35	20	4,6	4,2	4,1	5,9	6,2	0,004	0,6	0,2	224	244
24	7,68	7,04	7,18	178	24	14	50	5	23	40	15	4,6	4,3	4,3	6,2	6,4	0,006	0,5	0,1	200	254
25	7,69	7,36	7,24	151	24	2	50	5	25	50	20	4,7	4,7	4,6	6,4	7,0	0,018	1,2	0,5	208	261
28	7,67	7,31	7,36	193	3	3	50	5	24	30	20	4,0	4,2	4,2	7,0	6,6	0,010	1,0	0,4	240	265
29	7,84	7,32	7,39	227	70	12	50	5	22	50	15	4,8	4,8	4,4	6,6	6,4	0,011	0,6	0,1	251	272
30	7,88	7,34	7,31	169	7	6	50	5	25	30	10	4,6	4,2	4,4	6,4	6,4	0,014	0,5	0,2	248	262

Donde: Cr = agua cruda; Sed = agua clarificada; Fil = agua filtrada; Vt = volumen total (ml); Vm = volumen de la muestra (ml); Crd = agua cruda diluida

o **Color aparente (método AWWA 2120-B):** se determina por comparación visual de la muestra en soluciones coloreadas de concentraciones conocidas. Se utiliza un comparador en la escala platino-cobalto (unidades de color) con los tubos de Nessler de 50 ml, luego se coloca en el comparador entre dos patrones (los patrones son valores conocidos de color que van desde la unidad de color 5 hasta la de 50 de 5 en 5), en el caso de aguas con gran cantidad de materia orgánica disuelta en la misma, en muchas ocasiones es necesario efectuar una dilución de la muestra, tomando un volumen determinado y luego llevándolo a 50 ml con agua destilada, luego se compara con los patrones, y ese valor obtenido se multiplica por el factor de dilución que se calcula mediante la ecuación 3.1 (APHA, AWWA y WPCF, 1998):

$$F_d = V_t / V_m \quad (\text{Ec. 3.1})$$

donde:

F_d = factor de dilución.

V_t = volumen total (ml).

V_m = volumen de muestra (ml).

Tomando los valores de volumen total y volumen de la muestra de la tabla 3.1, como por ejemplo se toman los datos correspondientes al análisis del agua cruda efectuado el 1 de junio de 2010 y sustituyéndolo en la ecuación 3.1 se tiene que:

$$F_d = \frac{50 \text{ ml}}{5 \text{ ml}} = 10$$

De igual modo se aplicó el mismo procedimiento para todos los demás datos de las tablas 3.1, A.1 y A.2. Este parámetro se obtiene directamente por comparación visual para las aguas claras; para las aguas turbias, como es el agua cruda de la planta se le realiza una dilución y luego se multiplica el valor observado por el factor de dilución, que se obtiene utilizando la ecuación 3.1. Los resultados son reportados en las tablas B.1, B.2 y B.3.

o **Turbiedad (método AWWA 2130-A):** el método para la determinación de la turbiedad está basado en un turbidímetro como se observa en la figura 3.2, el cual debe calibrarse antes de cada medición, utilizando un patrón en cada rango del instrumento. Se agita la muestra y vierte en el tubo del turbidímetro, y finalmente se lee directamente la turbiedad (NTU) a partir de la escala del instrumento. Los resultados son reportados en las tablas 3.1, A.1 y A.2.



Figura 3.2 Equipo de medición de turbiedad

○ **Alcalinidad total (método AWWA 2320B):** para medir este parámetro, se deben colocar 50 ml de muestra en un matraz, a los que se le añaden 3 gotas de tiosulfato de sodio 0,1 N (si la muestra a analizar presenta niveles de cloro), 3 gotas de indicador mixto y finalmente se titula con ácido sulfúrico 0,02 N hasta que la muestra tenga un cambio de color fucsia a rosado pálido. El valor de la alcalinidad viene expresado en mg/l. Si la muestra posee una elevada alcalinidad es necesario tomar un volumen de muestra menor y completarlo hasta 50 ml y si por el contrario la alcalinidad es muy baja, se debe emplear un volumen de muestra superior a los 50 ml, y luego se le añaden los reactivos como se explicó antes. Posteriormente con la ecuación 3.2 se determina la alcalinidad total (APHA, AWWA y WPCF, 1998):

$$\text{Alcalinidad} = \frac{\text{ml de H}_2\text{SO}_4(0,02 \text{ N}) \times 1000}{\text{ml de muestra}} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Tomando los valores de ácido sulfúrico gastado en las titulaciones de la tabla 3.1, como por ejemplo se toman los datos correspondientes al análisis del agua cruda efectuado el 1 de junio de 2010 y sustituyéndolo en la ecuación 3.2 se tiene que:

$$\text{Alcalinidad} = \frac{4,2 \text{ ml de H}_2\text{SO}_4(0,02 \text{ N}) \times 1000}{50 \text{ ml}} = 84 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \text{ de CaCO}_3$$

De igual modo se aplicó el mismo procedimiento para todos los demás datos de las tablas A.1 y A.2. Todos los resultados obtenidos en esta muestra se pueden observar en las tablas B.1, B.2 y B.3.

○ **Dureza total (método AWWA 2340C):** generalmente se toman 50 ml de muestra del agua a analizar, aunque se debe tomar en cuenta que si posee una elevada dureza total es necesario tomar un volumen de muestra menor y completarlo hasta 50 ml y si por el contrario la dureza total es muy baja, se debe emplear un volumen de muestra superior a los 50 ml. Luego se le agrega al volumen empleado 1 ml de solución amortiguadora, 3 gotas de indicador eriocromo negro T y se titula con EDTA 0,02 N. Vira de color violeta a color azul. Posteriormente con la ecuación 3.3 se determina la dureza total (APHA, AWWA y WPCF, 1998):

$$\text{Dureza total} = \frac{\text{ml de EDTA}(0,02 \text{ N}) \times 1000}{\text{ml de muestra}} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Tomando los valores de volumen de EDTA gastado en las titulaciones de la tabla 3.1, como por ejemplo se toman los datos correspondientes al análisis del agua cruda efectuado el 1 de junio de 2010 y sustituyéndolo en la ecuación 3.3 se tiene que:

$$\text{Dureza total} = \frac{7,0 \text{ ml de EDTA} \times 1000}{50 \text{ ml}} = 140 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \text{ de CaCO}_3$$

De igual modo se aplicó el mismo procedimiento para todos los demás datos de las tablas A.1 y A.2. Todos los resultados obtenidos en esta muestra se pueden observar en las tablas B.1, B.2 y B.3.

○ **Aluminio residual (método AWWA 3500AI-B):** para llevar a cabo este análisis se toman 25 ml de la muestra a medir, se agregan los ml de ácido sulfúrico gastados en la alcalinidad más 1 ml adicional, 1 ml de ácido ascórbico, 10 ml de acetato de sodio y 5 ml de solución diluida de eriocromo cianina R. Finalmente se leen los mg/l en el espectrofotómetro 7 min después a una longitud de onda de 535 nm en donde se prepara un blanco para calibrar el equipo con la misma muestra, realizando el procedimiento mencionado pero después de agregar los ml de ácido sulfúrico se le añade 1 ml de la solución EDTA 0,02 N. Para todas las aguas se obtiene leyendo directamente del espectrofotómetro los resultados, que son reportados para el agua cruda, clarificada y filtrada en las tablas 3.1, A.1 y A.2.

○ **Cloro residual (método AWWA 4500CI-F):** este ensayo se lleva a cabo en el sitio en donde se toman las muestras al agua que han sido previamente tratada, ya que el efecto residual del cloro va disminuyendo debido a la liberación del cloro a la atmósfera, que es un gas. Se hace tomando en un tubo 10 ml de agua sedimentada o filtrada a la que se le añaden 5 gotas de un buffer y 5 gotas de sulfato.

Posteriormente se coloca el tubo de ensayo en un comparador al lado de otros 10 ml de agua destilada, a la que no se le añade nada y se gira el disco del comparador hasta encontrar la cloración que más coincida con la coloración rosada que indica la presencia de cloro en el agua, así se obtienen las partes por millón de cloro residual en el agua. Este parámetro se determina de forma directa al utilizar el comparador para medir las partes por millón de cloro residual los resultados, que son reportados para el agua clarificada y filtrada en las tablas 3.1, A.1 y A.2.

○ **Conductancia específica (método AWWA 2510):** esta prueba consiste en la medición de resistencia, medida en ohms o megaohms. Donde se toma un volumen de muestra en un beaker de 50 ml e introducir la celda del instrumento en la muestra, finalmente se lee en el conductímetro como se observa en la figura 3.3 y se ajusta a la escala hasta tomar la lectura. Para todas las aguas se obtiene leyendo directamente del conductímetro los resultados, que son reportados para el agua cruda, clarificada y filtrada en las tablas 3.1, A.1 y A.2.



Figura 3.3 Equipo de medición de conductividad

3.1.1.1 Aplicación de distribución de frecuencia

La aplicación de esta distribución se realizó para determinar el porcentaje de entrada y salida de cada parámetro y observar mediante gráfica la diferencia de cada parámetro en función a los análisis fisicoquímicos parciales. Para aplicar la distribución de frecuencia se procede a sumar los parámetros fisicoquímicos a partir de la ecuación 3.4 (Cermeño, 1992):

$$X = \sum X_i \quad (\text{Ec. 3.4})$$

donde:

X = valor total.

X_i = valor de un parámetro.

Tomando los valores apropiados en las tablas B.1, B.2 y B.3, como por ejemplo se toman los datos de pH correspondiente al análisis del agua cruda efectuado cada día del mes de junio de 2010 y sustituyéndolo en la ecuación 3.4 se tiene que:

$$X = (7,55+7,82+7,74+7,78+7,92+7,81+7,91+7,71+7,97+8,12+7,58+7,74+7,88+8,19+7,86+7,52+7,49+7,68+7,69+7,67+7,84+7,88)$$

$$X = 171,35$$

De forma análoga se realizó la suma para el resto de los parámetros fisicoquímicos parciales del agua cruda (entrada a la planta), clarificada y filtrada. Los resultados se encuentran reportados en las tablas desde la B.4 hasta la B.11.

Posteriormente se calcula el porcentaje de cada parámetro fisicoquímico parcial del agua cruda (entrada a la planta), clarificada y filtrada. A partir de la ecuación 3.5 (Cermeño, 1992):

$$\% = \frac{X_i}{X} \times 100 \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Como por ejemplo se toma el valor de pH correspondientes al análisis del agua cruda efectuada el 1 de junio de 2010 y sustituyéndolo en la ecuación 3.5 se tiene que:

$$\% = \frac{7,55}{171,35} \times 100$$

$$\% = 4,41$$

De igual modo se aplicó el mismo procedimiento para todos los demás datos, los cuales se encuentran reportados en las tablas desde la B.4 hasta la B.11. Finalmente se graficó el porcentaje (%) de pH vs los días en que se realizó la toma de ese parámetro. Todos los resultados obtenidos en esta muestra se pueden observar en las figuras desde la 4.1 hasta 4.24.

3.1.2 Análisis fisicoquímicos totales

Para la determinación de los análisis fisicoquímicos totales del agua coagulada, floculada, clarificada y filtrada, se recopilaron datos bimensualmente de alcalinidad total, dureza total, dureza cálcica, magnesio, cloruro, sulfato, nitrito, sílice, aluminio residual, color, turbidez, manganeso, conductividad específica, pH, dióxido de carbono libre y calcio durante cuatro meses. Además de realizarse todos los parámetros fisicoquímicos parciales mencionados anteriormente, también consta de los siguientes análisis (APHA, AWWA y WPCF, 1998):

- **Dureza cálcica (método AWWA 3500Ca-D):** generalmente se toman 50 ml de muestra del agua a analizar, aunque se debe tomar en cuenta que si posee una elevada dureza cálcica es necesario tomar un volumen de muestra menor y completarlo hasta 50 ml y si por el contrario la dureza cálcica es muy baja, se debe emplear un volumen de muestra superior a los 50 ml. Luego se le agrega al volumen empleado 2 ml de hidróxido de sodio 1 N, 0,2 gr de indicador murexida, se disuelve y se titula con EDTA 0,02 N hasta que la muestra cambie de un color rosado a morado oscuro. Posteriormente con la ecuación 3.6 se determina la dureza cálcica (APHA, AWWA y WPCF, 1998):

$$\text{Dureza cálcica} = \frac{\text{ml de EDTA (0.02N)} \times 1000}{\text{ml de muestra}} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Tomando los valores de volumen de EDTA gastados en las titulaciones de la tabla 3.2, como por ejemplo el análisis del agua coagulada efectuada en el mes de junio de 2010 para la dureza cálcica y sustituyéndolo en la ecuación 3.6 se tiene que:

$$\text{Dureza total} = \frac{5,1 \text{ ml de EDTA} \times 1000}{50 \text{ ml}}$$

$$\text{Dureza total} = 102 \text{ mg / l de CaCO}_3$$

De igual modo se aplicó el mismo procedimiento para todos los demás datos de las tablas desde la A.3 hasta la A.9. Todos los resultados obtenidos en estas muestras se pueden observar en las tablas 4.1 y 4.2.

- **Magnesio:** éste se obtiene a partir de la ecuación 3.7 (APHA, AWWA y WPCF, 1998):

$$\text{Magnesio} = (\text{DT} - \text{DC}) \times 0,24 \quad (\text{Ec. 3.7})$$

donde:

DT = dureza total (mg/l).

DC = dureza cálcica (mg/l).

Tomando los valores de la dureza total y cálcica de la tabla 4.1, como por ejemplo el análisis del agua coagulada efectuada en el mes de junio de 2010 y sustituyéndolo en la ecuación 3.7, se tiene que:

$$\text{Magnesio} = (110 - 102) \text{ mg/l} \times 0,24$$

$$\text{Magnesio} = 1,92 \text{ mg/l}$$

De igual modo se aplicó el mismo procedimiento para todos los demás datos de las tablas 4.1 y 4.2. Todos los resultados obtenidos en esta muestra se pueden observar en las tablas 4.1 y 4.2.

Tabla 3.2 Datos para determinar los parámetros fisicoquímicos totales en el mes de junio de 2010 del agua coagulada (mezcla rápida).

Alcalinidad (CaCO ₃)		Dureza (CaCO ₃)				Cloruros	
pH < 8,5		Total		Cálcica			
ml. de muestra	ml. de H ₂ SO ₄	ml. de muestra	ml. de EDTA	ml. de muestra	ml. de EDTA	ml. de muestra	ml. de AgNO ₃
50	4,3	50	5,5	50	5,1	100	2,4
Sulfato > 10		Nitrito		Sílice		Aluminio	
ml. de muestra	mg/l	ml. de muestra	mg/l	ml. de muestra	mg/l	ml. de muestra	mg/l
100	20,4	50	0	50	10,3	25	0,018
Manganeso		Color	Turbiedad	Conductividad	pH		
ml. de muestra	mg/l	Apar.	NTU	Micro Siemens (μS)			
100	0	20	15	300			

○ **Cloruros (método AWWA 4500CI-B):** se toman 100 ml de la muestra o se diluye hasta completar ese volumen con agua destilada, si el agua a analizar posee una elevada conductividad, luego se le agrega 1 ml del indicador de cromato de potasio y se agita suavemente. Posteriormente se titula con la solución de nitrato de plata 0,0141 N hasta observar un cambio de color amarillo a amarillo rojizo. Posteriormente con la ecuación 3.8 se determina el cloruro (APHA, AWWA y WPCF, 1998):

$$\text{Concentración de cloruro} = \frac{\text{ml de AgNO}_3 \times 500}{\text{ml de muestra}} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Tomando los valores de los análisis del contenido de cloruros de la tabla 3.2, como por ejemplo el análisis del agua coagulada efectuada en el mes de junio de 2010 para los cloruros y sustituyéndolo en la ecuación 3.8 se tiene que:

$$\text{Concentración de cloruro} = \frac{2,4 \text{ ml} \times 500}{100 \text{ ml}}$$

$$\text{Concentración de cloruros} = 12 \text{ mg / l}$$

De igual modo se aplicó el mismo procedimiento para todos los demás datos de las tablas desde la A.3 hasta la A.9. Todos los resultados obtenidos en esta muestra se pueden observar en las tablas 4.1 y 4.2.

○ **Sulfato (método AWWA 4500SO₄-E):** se toman 100 ml de la muestra o se diluye hasta completar ese volumen con agua destilada, luego se le añade 20 ml de la solución tampón > 10mg/l SO₄ y 0,3 g de cloruro de bario. Posteriormente se agita hasta disolver y se deja reposando por 5 min, para luego llevar las muestras al espectrofotómetro y leer a una longitud de onda de 420 nm en donde se utilizará agua destilada como blanco. Para todas las aguas se obtiene leyendo directamente del espectrofotómetro los resultados, que son reportados para el agua coagulada, floculada, clarificada y filtrada en las tablas 4.1 y 4.2.

○ **Nitrito (método AWWA 4500NO₂):** se toman 50 ml de la muestra, se agregan 2 ml de la solución de color y se agita hasta disolver para luego dejar reposando por 10 min y llevar la muestra al espectrofotómetro, donde se lee a una longitud de onda de 545 nm utilizando agua destilada como blanco. Para todas las aguas se obtiene leyendo directamente del espectrofotómetro los resultados, que son reportados para el agua coagulada, floculada, clarificada y filtrada en las tablas 4.1 y 4.2.

○ **Sílice (método AWWA 4500Si-D):** a 50 ml de muestra, se le agregan 1 ml de ácido clorhídrico 1:1, 2 ml de solución de molibdato de amonio, se mezcla bien y se deja reposar por 10 minutos. Luego, se añade 2 ml de la solución de ácido oxálico y se agita de nuevo y se deja reposando por 2 min para llevar la muestra al espectrofotómetro y se lee a una longitud de onda de 410 nm en donde se utiliza agua destilada como blanco. Para todas las aguas se obtiene leyendo directamente del espectrofotómetro los resultados, que son reportados para el agua coagulada, floculada, clarificada y filtrada en las tablas 4.1 y 4.2.

○ **Manganeso total (método AWWA 3500Mn-A):** se toman 100 ml de muestra, se agregan 5 ml de reactivo especial, 1 gota de peróxido de hidrógeno al 30% y se coloca a calentar en la plancha hasta reducir el volumen a 90 ml aproximadamente. Luego, se añade 1 g de persulfato de amonio, posteriormente se agita la muestra y se lleva a ebullición por 1 minuto. Finalmente se retira de la plancha para enfriar bajo chorro de agua después de 1 minuto, y completar hasta 100 ml con agua destilada, para leer la muestra en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 525 nm, utilizando agua destilada como blanco. Para todas las aguas se obtiene leyendo directamente del espectrofotómetro los resultados, que son reportados para el agua coagulada, floculada, clarificada y filtrada en las tablas 4.1 y 4.2.

○ **Dióxido de carbono libre:** para determinar la concentración del dióxido de carbono libre, se debe utilizar la tabla A.1 la cual da el valor del factor del pH para cada valor de pH; una vez conocido ese valor y conociendo el valor de la alcalinidad de la muestra se aplica la ecuación 3.9 (APHA, AWWA y WPCF, 1998):

$$CO_2 = \frac{\text{Alcalinidad}}{\text{Factor de pH}} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Tomando como ejemplo el análisis del agua coagulada de la tabla 3.2 efectuada en el mes de junio de 2010, se entró a la tabla C.1 con el valor de pH 7,1 el cual dio un factor de 6,25, sabiendo que la alcalinidad de la muestra es 86 mg/l, al aplicar la ecuación 3.9 queda:

$$CO_2 = \frac{86 \text{ mg/l}}{6,25}$$

$$CO_2 = 13,76 \text{ mg/l}$$

De igual modo se aplicó el mismo procedimiento para todos los demás datos de las tablas desde la A.3 hasta la A.9. Todos los resultados obtenidos en esta muestra se pueden observar en las tablas 4.1 y 4.2.

- **Calcio:** se obtiene a partir de la ecuación 3.10 (APHA, AWWA y WPCF, 1998):

$$Ca = Dca \times 0,4 \quad (\text{Ec. 3.10})$$

donde:

Ca = concentración de calcio (mg/l).

Dca = dureza cálcica (mg/l).

Tomando como ejemplo el análisis del agua coagulada de la tabla 3.2 efectuada en el mes de junio de 2010, sabiendo que la dureza cálcica de la muestra es 102 mg/l, al aplicar la ecuación 3.10 queda:

$$Ca = 102 \text{ mg/l} \times 0,4$$

$$Ca = 40,8 \text{ mg/l}$$

De igual modo se aplicó el mismo procedimiento para todos los demás datos de las tablas desde la A.3 hasta la A.9. Todos los resultados obtenidos en esta muestra se pueden observar en las tablas 4.1 y 4.2.

3.1.3 Análisis bacteriológicos

Para la determinación de los análisis bacteriológicos del agua cruda (entrada a la planta), y filtrada, se recopilaron datos de los números de tubos positivos con caldo de bilis verde brillante y con Ec medium y por último el número de colonias presentes correspondientes a cuarenta días de análisis. Todas las aguas sometidas a estudio fueron analizadas siguiendo los siguientes métodos (APHA, AWWA y WPCF, 1998):

○ **Captación de las muestras (método AWWA 9060A):** las muestras fueron captadas en envases especiales de vidrio, previamente esterilizados en el laboratorio de aguas de la planta; se realizó de forma rápida, para evitar la posible contaminación, producto del mal manejo, siguiendo las instrucciones de la norma y posteriormente fueron analizadas en el laboratorio de la planta.

○ **Determinación del número de colonias de bacterias vivas heterótrofas en el agua (método de la placa Petri fluida AWWA 9215B):** para realizar este análisis, se tomaron el número de placas Petri a utilizar y se rotularon, se colocaron los tubos de ensayo que contienen los 10 ml de el agar nutritivo en estado sólido, dentro de un baño de María, para que se fluidizarán; una vez que esto ocurrió, se agregó rápidamente 1 ml de muestra en el interior de una placa, se repitió este paso hasta terminar con la última muestra a analizar y luego se vertió el agar que se encontraba líquido en la placa, se mezcló, se tapó la placa y se invirtió cuando se volvió sólido el agar, en esa posición se introdujo la placa dentro de la incubadora por 24 horas a 35 °C.

Cuando se terminó el período de incubación se determinó el número de colonias utilizando el cuenta colonia Hellige donde se obtuvo un número promedio con el cual se entró con ese número a la tabla C.2, encontrándose el número más probable de colonias vivas de bacterias vivas. Todos los resultados obtenidos en esta muestra se pueden observar en las tablas desde la B.12 hasta la B.14.

○ **Determinación del índice de coliformes:** la existencia de este grupo se mide en (NMP) número más probable por 100 ml de muestra, es decir, la densidad de este grupo se obtiene, al conocer el número de tubos positivos según la tabla C.3 para agua cruda y C.4 para agua potable. Esta prueba tiene dos etapas, las pruebas presuntivas y las confirmativas.

1. Prueba presuntiva (método presuntivo AWWA 9221B.1): para esta prueba se usa como medio cultivo lauril triptosa. Para agua potabilizada se siembra de la siguiente manera: se agita el frasco que contiene la muestra de agua, se sacan 10 ml de muestra que se añaden rápidamente a un tubo de ensayo con el caldo de cultivo y esta operación se repite para 5 tubos de ensayos en caso de ser agua que se presume están contaminadas, se debe preparar el lauril de 10 es decir, el caldo se prepara diluyendo 35,5 g del medio en 1 litro de agua destilada. Se utilizan 15 tubos de ensayo con el medio de cultivo y dos tubos de ensayo con agua de dilución para realizar la siembra que se realiza de la siguiente manera: se agita el frasco que contiene a la muestra de agua, dándole alrededor de 25 golpes, para que los microorganismos se distribuyan.

Posteriormente, a los 5 primeros tubos con el medio de cultivo se le agregan 1 ml de muestra, y 1 ml a la primera agua de esa dilución, luego esta dilución se sirve 1 ml en los 5 siguientes tubos de ensayos y 1 ml de esa dilución se le agrega en la siguiente agua de dilución y esta última se toma 1 ml para los 5 tubos restantes obteniéndose así concentraciones de 1, 0,1 y 0,01. Una vez sembrados los tubos tanto los de muestras de agua potable como los de aguas presuntamente contaminadas, se colocan los tubos en

Tabla 3.3 Datos para determinar el número de colonias, coliformes totales y fecales del agua cruda y filtrada durante el mes de junio de 2010

Fecha	Hora de captación		Número de colonias contadas en el cuenta colonia		Números de tubos positivos				Cloro residual mg/l
					Coliformes totales		Coliformes fecales		
	Cruda	Filtrada	Cruda	Filtrada	Cruda	Filtrada	Cruda	Filtrada	
01/06/2010	08:20 a.m.	08:30 a.m.	4	0	5+5+4+	0	5+5+4+	0	0,4
02/06/2010	11:25 a.m.	11:30 a.m.	3	0	5+4+2+	0	5+4+1+	0	0,5
07/06/2010	11:15 a.m.	11:25 a.m.	4	0	5+5+1+	0	5+3+1+	0	0,5
08/06/2010	10:20 a.m.	10:30 a.m.	4	0	5+4+2+	0	5+4+3+	0	0,4
09/06/2010	10:10 a.m.	10:20 a.m.	3	0	5+4+3+	0	5+4+3+	0	0,3
14/06/2010	11:10 a.m.	11:15 a.m.	2	0	5+4+2+	0	5+2+2+	0	0,1
15/06/2010	09:00 a.m.	09:20 a.m.	8	0	5+3+3+	0	5+2+2+	0	0,4
16/06/2010	11:10 a.m.	11:15 a.m.	7	0	5+5+4+	0	5+1+1+	0	0,3
21/06/2010	10:10 a.m.	10:15 a.m.	4	0	5+5+2+	0	5+3+2+	0	0,4
22/06/2010	11:00 a.m.	11:10 a.m.	3	0	5+5+4+	0	5+5+1+	0	0,2
23/06/2010	10:30 a.m.	10:40 a.m.	6	0	5+5+3+	0	5+3+1+	0	0,2
28/06/2010	09:40 a.m.	09:45 a.m.	5	0	5+4+2+	0	5+3+1+	0	0,4
29/06/2010	11:25 a.m.	11:35 a.m.	3	0	5+5+1+	0	5+3+3+	0	0,1
30/06/2010	08:25 a.m.	08:45 a.m.	4	0	5+5+4+	0	5+5+3+	0	0,2

una incubadora durante 24 horas a 35 °C +/- 0,5 °C y al transcurrir ese tiempo se examinan los tubos, los que presentan formación de gas se consideraran positivos a la prueba presuntiva y con ellos se continua con la prueba confirmativa.

2. Prueba confirmativa (método confirmatorio AWWA 9221B.2): los tubos que dan positivos en la prueba presuntiva se le aplica la prueba confirmativa para determinar la presencia de coliformes totales utilizando tubos de ensayos con el caldo de cultivo bilis verde brillante y para los coliformes fecales el caldo Ec medium. Para esta prueba los tubos con bilis verde brillante y Ec medium se rotulan con el mismo número que identificó la muestra que resultó positiva en la presuntiva, y colocando el tubo de caldo lactosado positivo entre el tubo con bilis verde brillante y el de Ec medium, en posición inclinada en una mano, con la otra se debe sostener un asa de platino que se esteriliza en el mechero, hasta llegar al rojo vivo y después de pasar las bocas de los tres tubos de ensayo por el mechero, se debe introducir el asa en el tubo lactosado positivo y se introduce en los tubos de las pruebas confirmativas, ésto se realiza 3 veces para cada prueba confirmativa.

Luego se tapan los tubos y el caldo bilis verde brillante inoculado se coloca en una incubadora a 37 °C de 24 a 48 horas y el caldo Ec medium inoculado se coloca en baño de María a 42 °C por 24 horas. La formación de gas transcurrido el tiempo indica la que la prueba da positiva. Finalmente utilizando las tablas 3.3, A.10 y A.11, donde se encuentran el número de tubos positivos de cada tipo de agua estudiada, se entró en las tablas C.3 y C.4 para agua cruda y agua potable respectivamente y se obtuvo así el número más probable de coliformes presentes en la muestra. Todos los resultados obtenidos en esta muestra se pueden observar en las tablas desde la B.12 hasta la B.14.

3.1.3.1 Aplicación de la prueba chi-cuadrado

La aplicación de esta prueba se hizo en función de la remoción del número de colonias, organismos de coliformes totales y fecales. Antes de aplicar la prueba de chi-cuadrado se debe determinar la remoción de cada parámetro estudiado en los análisis bacteriológicos, el cual se realiza por la siguiente ecuación 3.11 (APHA, AWWA y WPCF, 1998):

$$\% \text{ Remoción} = \frac{(\text{Valor de entrada a la unidad} - \text{Valor Óptimo})}{\text{Valor de entrada a la unidad}} \times 100 \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Tomando los valores apropiados reportados en las tablas desde la B.12 hasta la B.14, por ejemplo para el día 1 de julio de 2010 tiene de número de colonias 240 ufc/1 ml de entrada y filtrada para el mismo día tiene 1 ufc/1 ml, se aplica la ecuación 3.11 asumiendo que el valor crudo de la característica en cuestión es el valor de entrada a la unidad y el valor óptimo es ahora el valor de salida de ella, así se tiene que:

$$\% \text{ Remoción} = \frac{(240 \text{ ufc/1 ml} - 1 \text{ ufc/1 ml})}{240 \text{ ufc/1 ml}} \times 100$$

$$\% \text{ Remoción} = 99,583 \%$$

Se realizaron los mismos pasos para la remoción de coliformes totales y fecales, los cuales se pueden observar en las tablas B.15, B.16 y B.17.

Posteriormente se calcula el promedio de cada remoción (R_p) a través de la siguiente ecuación 3.12:

$$\% R_p = \frac{1}{n} \sum R_i \quad (\text{Ec. 3.12})$$

donde:

R_i = remoción diaria

n = número de remociones

En las tablas desde la B.15 hasta la B.17 se encuentran los valores de las remociones; tomando como ejemplo la remoción de colonias efectuado en el mes de junio de 2010, al aplicar la ecuación 3.12 se tiene que:

$$R_p = (99,583+99,444+99,583+99,583+99,444+99,166+99,792+99,762+99,583+99,444+99,722+99,667+99,444+99,583) \% / 14$$
$$R_p = 99,557 \%$$

De igual modo se aplicó el mismo procedimiento para todos los demás datos. Todos los resultados obtenidos en esta muestra se pueden observar en las tablas desde la B.15 hasta la B.17.

Para aplicar la prueba de chi-cuadrado se utilizan los datos de tres o más grupos o categorías, en este caso como se quiere analizar si el agua se comporta igual todos los días, se realizó análisis cada tres días a la semana por tres meses, que se observan en las tablas desde la B.15 hasta la B.17. Allí mismo se puede observar el promedio de remoción calculado para cada parámetro bacteriológico que es el valor que se utilizó para realizar la prueba en cuestión aplicando las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3 de la siguiente forma, por ejemplo para el número de colonias en el mes de junio se tiene 99,557 %, para julio 99,555 % y finalmente para agosto un 99,596% se tiene que:

Se establece la prueba de hipótesis de la siguiente manera:

1. Hipótesis nula (H_0): los tres grupos se comportan de igual manera.

Hipótesis opcional (H_1): los tres grupos se comportan de diferente manera.

2. Se calculan los grados de libertad de la prueba (f):

$f = 3-1 = 2$, dado a que no existen parámetros o cantidades estadísticas en las que se basan los porcentajes de frecuencia esperado para cada grupo.

3. Se establece un nivel de significancia de 0,05 y con ayuda de los grados de libertad ya calculados se busca en la tabla C.5 el valor tabulado para la prueba, así que para un 95 % de probabilidad se tiene que $X_{\alpha}^2(2;0,05) = 5,991$.

4. Se establece la regla de decisión:

Recházese H_0 si $X_c^2 > 5,991$ para un nivel de significancia de 0,05. De otro modo, acéptese H_0 .

5. Se calculan los porcentajes de frecuencias observadas para cada mes (junio, julio y agosto) aplicando la ecuación 2.2:

$$O_{\text{junio}} = \frac{99,557\%}{(99,557\% \text{ junio} + 99,555\% \text{ julio} + 99,596\% \text{ agosto})} \times 100$$

$$O_{\text{junio}} = 33,329\%$$

De igual modo se calcula el porcentaje de frecuencia observada para el mes de julio y agosto la cual es para julio 33,329 % y agosto 33,342 %.

6. Se calcula el porcentaje de frecuencia esperado para cada grupo aplicando la ecuación 2.3:

$$E = \frac{(33,329 + 33,329 + 33,342)\%}{3} \times 100$$

$$E = 33,333\%$$

Los resultados se encuentran reportados en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Resumen de las variables calculadas para la prueba de chi-cuadrado durante los meses de junio, julio y agosto con respecto a el número de colonias.

Grupo	% Frecuencias observada (O_i)	% Frecuencias esperada (E)	$(O_i - E)$	$(O_i - E)^2/E$
Junio	33,329	33,333	-0,004	4,8E-07
Julio	33,329	33,333	-0,004	4,8E-07
Agosto	33,342	33,333	0,009	0,0000024
Σ	100	100	0,001	0,0000034

Se comparan los valores X^2 calculado y tabulado de la prueba para tomar la decisión; para el nivel de significancia de 0,05 dado a que $X_c^2 < X_t^2$ se acepta la hipótesis nula. Se realiza el mismo procedimiento para los coliformes totales y fecales en los meses de junio, julio y agosto, los cuales se reportados en las tablas 4.3, 4.4 y 4.5.

3.2 CONSTATACIÓN DE LA DEMANDA DE CLORO EN LA PLANTA DE ESTRUCTURA MODULAR QUE GARANTICE LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA

Para garantizar la potabilización del agua se determinó la cantidad de cloro necesaria que consumen las sustancias reductoras y la materia orgánica presente en el agua mediante la realización de la demanda de cloro, en donde se fueron tomando muestras de agua cruda por un día a la semana durante tres meses, la cual se dividió en porciones iguales y cada una de ellas se le añadió una dosis diferente de una solución estandarizada de cloro, para producir una serie de dosis crecientes. Después de un tiempo de contacto apropiado, se midió el cloro residual para así graficar el cloro residual libre vs el cloro añadido y finalmente determinar la dosis requerida de cloro.

3.2.1 Procedimiento

A continuación se describen los pasos que se cumplieron para la realización del ensayo de la demanda de cloro (APHA, AWWA y WPCF, 1998):

1. Se prepararon varias soluciones de cloro a una concentración de 200 mg/l obtenida diluyendo y normalizando la solución proveniente del agua alimentada por un clorador de solución.
2. Se utilizaron diez (10) frascos de vidrio previamente lavados con agua destilada esto con la finalidad de que no haya interferencia de sustancias extrañas, en los cuales se vertieron porciones de 200 ml de la muestra de agua cruda.
3. A estos frascos se les agregó porciones en forma sucesivas ascendente de la solución de cloro de reciente preparación para no perder el poder desinfectante activo del cloro, por ejemplo 0,5 ml de esta solución al primer frasco, 1 ml al segundo y así sucesivamente agitando fuertemente por un período determinado.
4. Se procedió a dejar reposando los frascos en un lugar oscuro durante 30 min o un tiempo igual al período de contacto correspondiente al punto de control.
5. Se determinó la concentración de cloro residual de cada frasco mediante la prueba del DPD.
6. Si las cantidades de solución de cloro usadas no producen estos resultados deben seleccionarse diferentes proporciones y agregarse a nuevas porciones de muestras de agua cruda provenientes del mismo envase con la finalidad de que el agua estudiada presente las mismas características para todas las muestras, hasta que se logren los resultados deseados.

3.2.2 Determinación de la cantidad de cloro agregado en ppm (mg/l)

Para determinar la cantidad de cloro agregado al agua utilizada se utilizó la siguiente ecuación 3.13 (APHA, AWWA y WPCF, 1998):

$$\text{Cl añadido} = \frac{V_{\text{Cl}}}{V_{\text{H}_2\text{O}}} \times CS \quad (\text{Ec. 3.13})$$

Tabla 3.5 Datos para determinar la demanda de cloro del mes de julio de 2010

Muestra	Caudal de entrada (l/s)	Volumen de agua (ml)	Primera semana 07/07/2010		Segunda semana 14/07/2010		Tercera semana 21/07/2010		Cuarta semana 28/07/2010	
			Concentración de la solución patrón de cloro 212,70 mg/l		Concentración de la solución patrón de cloro 203,80 mg/l		Concentración de la solución patrón de cloro 221,56 mg/l		Concentración de la solución patrón de cloro 194,98 mg/l	
			Cloro añadido (ml)	Cloro residual (mg/l)						
1	345	200	1,9	0,2	2,0	0,3	2,7	0,2	3,0	0,7
2		200	2,1	0,2	2,4	0,4	2,9	0,3	3,3	0,7
3		200	2,3	0,2	2,8	0,6	3,1	0,6	3,6	0,8
4		200	2,4	0,2	3,1	0,8	3,2	0,7	3,9	1,0
5		200	2,6	0,2	3,5	0,9	3,4	0,7	4,2	1,2
6		200	2,8	0,4	3,9	1,1	3,6	0,5	4,5	0,6
7		200	3,0	0,2	4,3	0,5	3,8	0,7	4,8	1,4
8		200	3,2	0,4	4,7	1,5	4,0	0,9	5,1	1,8
9		200	3,4	0,8	5,1	1,8	4,2	1,0	5,4	1,9
10		200	3,6	0,9	5,5	2,0	4,3	1,2	5,7	2,0

donde:

Cl añadido = cantidad de cloro añadido (mg/l).

V_{Cl} = volumen de la solución de cloro (ml).

V_{H_2O} = volumen de agua cruda (ml).

CS = concentración de cloro empleado para la dilución deseada (mg/l).

Tomando los valores apropiados de las tablas 3.5, A.12 y A.13, como por ejemplo se toman los datos del volumen de agua cruda, de la concentración de la solución patrón de cloro y del volumen de la solución de cloro añadido en ml correspondientes a la primera semana del mes de julio de 2010 Mediante la ecuación 3.13 se tiene que:

$$Cl\ añadido = \frac{1,9\ ml}{200\ ml} \times 212,70\ mg/l$$

$$Cl\ añadido = 2,0\ mg/l$$

Estos cálculos se efectuaron similarmente para los demás valores de las tablas A.12 y A.13, presentándose los resultados en las tablas B.18, B.19 y B.20. Posteriormente con los datos de las tablas B.18, B.19 y B.20 se graficaron los valores de cloro residual libre vs cantidad de cloro añadido, los cuales se pueden apreciar en las figuras desde la 4.25 hasta la 4.37.

3.2.3 Determinación de la dosis requerida de cloro por la planta

De acuerdo a la teoría se deduce que el punto de inflexión correspondiente a las coordenadas (3,2; 0,2) de la figura 4.25 corresponde a la demanda requerida por el agua a esas condiciones.

Para un caudal de 345 l/s la dosis requerida de cloro se obtuvo por medio de la siguiente relación:

$$3,2\ mg/l \times 1\ kg/10^6\ mg \times 345\ l/s \times 3600\ s/h = 4,0\ kg/h$$

De igual modo se aplicó el mismo procedimiento para todos los demás datos. Todos los resultados obtenidos en esta muestra se pueden observar en la tabla 4.6.

3.3 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ADECUADA DE COAGULANTE A TRAVÉS DE UNA SIMULACIÓN QUE GARANTICE EL GRADIENTE DE VELOCIDAD OPERACIONAL EN ÉPOCA DE LLUVIA DE LA PLANTA

Para determinar la dosis adecuada de coagulante se seleccionó mediante la prueba de jarra la dosificación de policloruro de aluminio que fue capaz de producir la turbiedad y el color requerido en el proceso. Para esto, se procedió a tomar muestras de agua cruda con alta turbiedad y color, para así realizar ensayos con cantidades crecientes de coagulante en el equipo de mezcla, el cual se realizó simulando el gradiente de velocidad operacional en época de lluvia del proceso de potabilización. Durante la

realización del mismo, se observó el tiempo en el que aparece el primer grumo, el índice de Willcomb y a cual dosis corresponde el grumo más grande. Así como también se midió el pH, el color, el aluminio, la alcalinidad y cloro residual para cada ensayo de jarra realizado.

3.3.1 Gradiente de velocidad operación en época de lluvia de la planta

3.3.1.1 Mezcla rápida o coagulación

Para el proceso convencional de mezcla rápida se requiere de un tiempo de retención (T_r) de 30 a 180 segundos y un gradiente de velocidad (G) de 400 a 800 s^{-1} (Arboleda, 2000). Debido a que no existe un dispositivo de mezcla rápida, ésta ocurre en un tramo de tubería de 28 pulgadas de diámetro (0,711 m) que va desde la aplicación de los coagulantes hasta el cilindro central del floculador, el cual tiene 49,31 m de longitud. En el tramo de tubería existen: cuatro válvulas mariposas de diámetro 28 pulgadas (0,711 m) y tres codos de 90° de diámetro 28 pulgadas de diámetro. A continuación se determinan las pérdidas de carga a la entrada de la planta, así como también el tiempo de retención y el gradiente de velocidad en el proceso de coagulación:

o Pérdida por accesorios

Las pérdidas de carga por accesorio dependen del coeficiente de resistencia (k), el cual está asociado con el diámetro al cual se refiere la velocidad. A partir de la tabla C.6, se tiene que para una válvula mariposa con un diámetro de 28 pulgadas el coeficiente de resistencia, se calcula por medio de la siguiente ecuación (Crane, 1992):

$$k_1 = 15 \times Ft \quad (\text{Ec. 3.14})$$

donde:

F_t = factor de fricción en accesorios (0,011) (valor extraído de la tabla C.7).

k_1 = coeficiente de resistencia para una válvula mariposa.

Sustituyendo este valor en la ecuación 3.14 se tiene:

$$k_1 = 15 \times 0,011$$

$$k_1 = 0,165$$

De igual modo se aplicó el mismo procedimiento para todos los demás accesorios. Todos los resultados obtenidos en esta muestra se pueden observar en la tabla 4.7.

Utilizando la tabla C.8, se tiene para un codo de 90° de diámetro 28 pulgadas el coeficiente de resistencia (k), se calcula a partir de la siguiente ecuación (Crane, 1992):

$$k_2 = 30 \times Ft \quad (\text{Ec. 3.15})$$

donde:

k_2 = coeficiente de resistencia para un codo de 90°.

Sustituyendo este valor en la ecuación 3.15 se tiene:

$$k_2 = 30 \times 0,011$$

$$k_2 = 0,333$$

De igual modo se aplicó el mismo procedimiento para todos los demás accesorios. Todos los resultados obtenidos en esta muestra se pueden observar en la tabla 4.7.

Considerando un coeficiente de resistencia por dirección de codo de 90° que es $k_3 = 0,750$, respectivamente obtenido a partir de la tabla C.9. Con estos valores de (k) para cuatros válvulas, dos codos de 90° y un coeficiente de resistencia por dirección de codo de 90° de diámetro 28 pulgadas, se tiene:

$$k_t = (4 \times k_1) + (2 \times k_2) + k_3 \quad (\text{Ec. 3.16})$$

donde:

k_t = coeficiente de resistencia total.

Sustituyendo los valores de (k) en la ecuación 3.16 se obtiene:

$$k_t = (4 \times 0,165) + (2 \times 0,333) + 0,750$$

$$k_t = 2,076$$

La velocidad media de flujo (v) se refiere a la velocidad promedio de cierta sección transversal, la cual se expresa de la siguiente manera (Crane, 1992):

$$v = \frac{Q}{A_T} \quad (\text{Ec. 3.17})$$

donde:

Q = caudal (m^3/s).

A_T = área de la sección transversal (m^2).

Se tiene para un diámetro nominal de tubería de 28 pulgadas (0,711m) y un espesor de 0,433 pulgadas (0,011m), que el área transversal interna es igual a 576,360 pulg² (0,372 m²) respectivamente, obtenidos a partir de la tabla C.10.

Debido a que no se posee un equipo de medición de caudal fijo en la planta, se va considerar 345 l/s (0,345 m³/s), que fue un valor medido con un caudalímetro portátil digital el día 30/08/2010 y mientras no exista ninguna modificación en cuanto a una

válvula, tubería u otra causa que haga cambiar el caudal se seguirá trabajando con este valor. Por lo tanto, al sustituir en la ecuación 3.17, la velocidad que se tiene es:

$$v = \frac{0,345 \text{ m}^3/\text{s}}{0,372 \text{ m}^2}$$

$$v = 0,927 \text{ m/s}$$

Sustituyendo la velocidad del flujo y el valor de coeficiente de resistencia (k) en la ecuación 2.6 se tiene:

$$h_v = 2,076 \times \frac{(0,927 \text{ m/s})^2}{(2 \times 9,81 \text{ m/s}^2)}$$

$$h_v = 0,0909 \text{ m}$$

○ **Pérdida por tramo recto de tubería**

Para determinar esta pérdida primero se procede a calcular el número de Reynolds para luego ubicar el factor de fricción (f), en la figura D.1 donde se intercepta el valor del número de Reynolds con la curva de rugosidad relativa (e/d). Los valores de “ρ” y “μ” son 997,048 kg/m³ y 0,894 x 10⁻³ Pa.s respectivamente, para el agua a una temperatura de 25 °C debido a que este es el valor promedio de la temperatura del agua cruda (Arboleda, 2000).

El diámetro interno de una tubería de 28 pulgadas con un espesor de 0,433 pulgadas es de 27,089 pulgadas (0,688m). Sustituyendo los valores antes mencionados en la ecuación 2.8 se tiene que:

$$Re = \frac{0,688 \text{ m} \times 0,927 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 997,048 \text{ kg/m}^3}{0,894 \times 10^{-3} \text{ Pa} \times \text{s}}$$

$$Re = 7,113 \text{ } 10^5$$

El valor de la rugosidad relativa se obtiene a partir de la figura D.2, donde se intercepta el diámetro de la tubería con la curva de acero comercial.

$$e/d = 0,000062$$

Luego con estos valores se va a la figura D.1 y se tiene que:

$$f = 0,0190$$

Al sustituir el valor del factor de fricción en la ecuación 2.7 se tiene lo siguiente:

$$h_L = \frac{0,0190 \times 49,31 \text{ m} \times (0,927 \text{ m/s})^2}{0,688 \text{ m} \times 2 \times 9,81 \text{ m/s}^2}$$

$$h_L = 0,0596 \text{ m}$$

Los resultados de las pérdidas de carga por accesorios, tramo de tubería, velocidad media, número de Reynolds, rugosidad relativa y factor de fricción se encuentran reportados en la tabla 4.8.

○ **Pérdida de carga total**

Las pérdidas de carga total y pérdidas de fricción debidas al flujo del fluido vienen dadas por la suma de las pérdidas por carga de flujo de fluido y las pérdidas por accesorios o válvulas. Sustituyendo los valores h_v y h_L calculados anteriormente, en la ecuación 2.5 se tiene que:

$$h_f = 0,0909 \text{ m} + 0,0596 \text{ m}$$

$$h_f = 0,1505 \text{ m}$$

Este resultado se encuentra reportado en la tabla 4.8.

○ **Cálculo del tiempo de retención**

El tiempo de retención se calcula a partir de la ecuación 2.4: ($Tr = V/Q$). El volumen de una tubería se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$V_t = A_T \times L \quad (\text{Ec. 3.18})$$

donde:

V_t = volumen de la tubería (m^3).

Al sustituir los valores de (A_T) y (L) en la ecuación 3.18 se tiene que:

$$V_t = 0,372 \text{ m}^2 \times 49,31 \text{ m}$$

$$V_t = 18,343 \text{ m}^3$$

Utilizando la ecuación 2.4, se tiene que el tiempo de retención en la tubería de mezcla rápida es:

$$Tr = \frac{18,343 \text{ m}^3}{0,345 \text{ m}^3/\text{s}}$$

$$Tr = 53,168 \text{ s}$$

El valor del tiempo de retención de la mezcla rápida se encuentra reportado en la tabla 4.8.

○ **Cálculo del gradiente de velocidad**

Sustituyendo los valores de pérdida de carga y tiempo de retención calculados anteriormente; los valores de aceleración de gravedad, densidad del fluido y la viscosidad absoluta en la ecuación 2.3 se tiene lo siguiente:

$$G = \sqrt{\frac{997,048 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 0,1505 \text{ m}}{53,168 \text{ s} \times 0,894 \times 10^{-3} \text{ kg/ms}}}$$

$$G = 175,892 \text{ s}^{-1}$$

Este resultado se encuentra reporta en la tabla 4.8.

○ **Conversión del gradiente de velocidad**

Para convertir el gradiente de velocidad (s^{-1}) a velocidad de rotación (rpm) se debe aplicar la ecuación desarrollada por Tekippe para determinar el gradiente de velocidad para las condiciones normales de ensayo (volumen de muestra 1 litro, agitado por paletas de 1" x 3") (Arboleda, 2000):

$$G = 0,084 \times N^{3/2} \tag{Ec. 3.19}$$

donde:

N = velocidad de rotación (rpm).

Despejando la velocidad de rotación (N) de la ecuación 3.19 y sustituyendo el valor del gradiente de velocidad en la misma:

$$N = \sqrt[3/2]{\frac{175,892}{0,084}}$$

$$N = 163,673 \text{ rpm}$$

Este resultado se encuentra reportado en la tabla 4.8.

3.3.1.2 Mezcla lenta o floculación

El floculador de la planta modular está constituido por:

- Diámetro del floculador: 8,11 m.
- Altura del floculador: 4,45 m.
- Diámetro del tubo central: 0,7 m.

El proceso de floculación requiere de un tiempo de retención (T_r) de 10 a 30 minutos y de un gradiente de velocidad (G) de 20 a 75 s^{-1} .

○ **Cálculo del volumen del floculador**

Se calcula usando la ecuación 3.20 (Arboleda, 2000):

$$V_f = A_f \times H_f \quad (\text{Ec. 3.20})$$

donde:

V_f = volumen del floculador (m^3).

A_f = área del floculador (m^2).

H_f = altura en el floculador (m)

A partir de la siguiente ecuación 3.21 se calcula el área en el floculador (Arboleda, 2000):

$$A_f = \frac{\pi \times D_f^2}{4} - D_{tc}^2 \quad (\text{Ec. 3.21})$$

donde:

D_f = diámetro del floculador (m) (8,11 m).

D_{tc} = diámetro del tubo central (m) (0,7 m).

Sustituyendo en la ecuación 3.21 se tiene:

$$A_f = \frac{\pi \times (8,11 \text{ m})^2}{4} - (0,7 \text{ m})^2$$
$$A_f = 51,167 \text{ m}^2$$

Sustituyendo en la ecuación 3.20 se tiene:

$$V_f = 51,167 \text{ m}^2 \times 4,45 \text{ m}$$

$$V_f = 227,693 \text{ m}^3$$

Los resultados del volumen y área del floculador se encuentran reportados en la tabla 4.7.

○ **Cálculo del tiempo de retención del floculador**

El tiempo de retención del floculador se obtiene al emplear la ecuación 2.4:

$$T_r = \frac{227,693 \text{ m}^3}{0,345 \text{ m}^3/\text{s}}$$

$$Tr = 659,980 \text{ s} = 11 \text{ min}$$

El valor del tiempo de retención de la mezcla lenta se encuentra reportado en la tabla 4.7.

○ **Cálculo de la velocidad en el floculador (V_2)**

Se obtiene aplicando la ecuación 3.17:

$$v = \frac{0,345 \text{ m}^3/\text{s}}{51,167 \text{ m}^2}$$

$$v = 0,000674 \text{ m/s}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 2.9 para determinar la pérdida por ensanchamiento súbito se tiene que:

$$h_e = \frac{(0,927 \text{ m/s} - 0,000674 \text{ m/s})^2}{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2}$$

$$h_e = 0,0432 \text{ m}$$

Los resultados de la velocidad del floculador y pérdida por ensanchamiento se encuentran reportados en la tabla 4.7.

○ **Cálculo del gradiente de velocidad**

Aplicando la ecuación 2.3 y sustituyendo los valores de: pérdida por ensanchamiento calculado anteriormente, aceleración de gravedad, densidad del fluido y la viscosidad absoluta se tiene lo siguiente:

$$G = \sqrt{\frac{997,048 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 0,0432 \text{ m}}{659,980 \text{ s} \times 0,894 \times 10^{-3} \text{ kg/ms}}}$$

$$G = 26,747 \text{ s}^{-1}$$

Este resultado se encuentra reportado en la tabla 4.7.

○ **Conversión del gradiente de velocidad**

Sustituyendo el valor del gradiente de velocidad en la ecuación 3.19, ya despejada la velocidad de rotación (rpm) se obtiene lo siguiente:

$$N = \sqrt[3/2]{\frac{27,913}{0,084}}$$

$$N = 47,975 \text{ rpm}$$

Este resultado se encuentra reportado en la tabla 4.7.

3.3.1.3 Sedimentación

El sedimentador es de tipo circular de flujo ascendente. Para su análisis los factores que se deben considerar son: carga superficial y tiempo de retención.

o Carga superficial

La carga superficial es la velocidad crítica mínima de sedimentación que se espera que tenga cierto porcentaje de partículas de la suspensión. Indica teóricamente que la sedimentación es función del área superficial del tanque e independiente de la profundidad y se expresa en $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$. Para determinar la carga superficial real que maneja la planta durante un tiempo específico. Se determina a partir de la siguiente ecuación 3.22 (Arboleda, 2000):

$$CS = \frac{Q}{A_s} \quad (\text{Ec. 3.22})$$

donde:

CS = carga superficial ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$).

A_s = área superficial (m^2).

o Área superficial

Considerando que el diámetro del sedimentador es de 23,30 m y el área del floculador es de $51,167 \text{ m}^2$, se tiene que:

$$A_s = \frac{\pi \times D_s^2}{4} - A_f \quad (\text{Ec. 3.23})$$

donde:

D_s = diámetro del floculador (m).

Sustituyendo los valores mencionados anteriormente en la ecuación 3.23 se tiene que:

$$A_s = \frac{\pi \times (23,30 \text{ m})^2}{4} - 51,167 \text{ m}^2$$

$$A_s = 375,218 \text{ m}^2$$

Sustituyendo el valor del área superficial en la ecuación 3.22, y para un caudal de 29.808 m³/d (300 l/s) se tiene que:

$$CS = \frac{29808 \text{ m}^3/\text{s}}{375,218 \text{ m}^2}$$

$$CS = 79,442 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$$

o **Tiempo de retención**

El tiempo de retención se calcula a partir de la ecuación 2.4: ($T_r = V/Q$). El volumen del sedimentador viene dado por la siguiente expresión (Arboleda, 2000):

$$V_s = A_s \times H_s \quad (\text{Ec. 3.24})$$

donde:

V_s = volumen del sedimentador (m³).

H_s = altura en el sedimentador (m) (4,85m).

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación 3.24 se obtiene el siguiente volumen del sedimentador:

$$V_s = 375,218 \text{ m}^2 \times 4,85 \text{ m}$$

$$V_s = 1.819,807 \text{ m}^3$$

Sustituyendo el volumen del sedimentador en la ecuación 2.4 para hallar el tiempo de retención en el sedimentador, se tiene:

$$T_r = \frac{1.819,807 \text{ m}^3}{0,345 \text{ m}^3/\text{s}}$$

$$T_r = 5.274,803 \text{ s} = 87,913 \text{ min} = 1,47 \text{ h}$$

Los resultados de la carga superficial, área superficial, volumen del sedimentador y tiempo de retención se encuentran reportados en la tabla 4.7.

3.3.2 Determinación de la dosis adecuada de policloruro de aluminio (método de la prueba de jarra)

Es esencial un control riguroso de las cantidades de reactivos que se usen, para que pueda garantizar una **óptima** coagulación. Un ligero exceso o defecto en la dosificación de cualquiera de los reactivos hará que la coagulación no sea satisfactoria. Puesto que las características del agua cruda pueden variar de un día para otro, es pertinente determinar las dosificaciones adecuadas de reactivos diariamente (Arboleda, 2000).

La porción de muestra tratada en el laboratorio, que presentó la mayor disminución del color, la turbiedad y la floculación más satisfactoria, fue la seleccionada para indicar las dosificaciones de reactivos requeridos para el tratamiento óptimo del agua cruda. Las determinaciones de la alcalinidad y del valor de pH indicaron los valores correspondientes que deben resultar en el efluente del tanque de sedimentación, seguido por un tratamiento eficaz.

3.3.2.1 Procedimiento

A continuación se describen los pasos que se cumplieron para la realización del ensayo de la prueba de jarra para determinar la dosis adecuada de policloruro de aluminio (Arboleda, 2000).

- Se le agregó la cantidad de hipoclorito de calcio requerida a seis muestras de un litro cada una de agua cruda que se encontraban en un beaker.
- Seguidamente se le agregó cantidades crecientes de policloruro de aluminio a las mismas muestras.
- Luego se agitaron rápidamente las mezclas (163 rpm), durante 53 segundos.
- Posteriormente, se detiene el proceso de agitación rápida y se pasa a una velocidad más lenta (48 rpm), por un tiempo de 11 minutos. Durante este proceso de mezcla lenta se observó y se anotó el tiempo cuando apareció el primer grumo, se dejó crecer, luego se detuvo la mezcla y se observó a cual dosis corresponde el mejor grumo, de acuerdo a sus características.
- Finalmente se dejó sedimentar por 1,47 hr y se sacó el sobrenadante para medir la turbiedad y el pH del agua.

Para que los resultados de la prueba sean confiables es necesario observar algunas precauciones (Arboleda, 2000):

- La solución de policloruro de aluminio o coagulante debe ser muy fresca, recién preparada. Si el producto se está utilizando en planta, se debe tomar muestra de ese para preparar la solución a utilizar en el ensayo.
- Si se usa policloruro de aluminio en la prueba, se pesa 1 gramo y se diluye a 1000 ml, cada mililitro de esta solución tiene 1 ppm del producto.
- Se debe usar un volumen de 1 litro de agua cruda en cada beaker, esta agua debe ser recientemente captada, se montan 6 jarras simultáneas.
- Cuando deben agregarse varios productos químicos el orden de adición debe ser el mismo que en el sistema de tratamiento.

La observación de los resultados de la prueba de jarro es visual y se complementa con medidas de tiempo para la formación de grumos, el coagulante residual, el pH y la turbiedad del agua clarificada y filtrada. La observación visual se hace para encontrar donde aparece el primer flóculo, el tiempo necesario y en cual jarro se formó el grumo más grande y pesado. El tiempo de formación del flóculo se anota cuando aparece el primer grumo visible.

La cantidad de coagulante residual permite estimar la sobredosis de coagulante, la cual no debe sobrepasar concentraciones de 0,1 y 0,3 mg/l. Concentraciones mayores son indicadoras de una dosis no adecuada. Estas medidas son realizadas en muestras

de 50 ml de sobrenadante después de haber clarificado durante un período de tiempo definido.

Tabla 3.6 Datos del ensayo de jarra para determinar la dosis adecuada de coagulante del día 02/08/2010.

AGUA CRUDA								
Turbiedad (NTU): 126		Alcalinidad total (mg/l): 96		pH: 7,82		Color (U.C.): 250		
JARRA Nº	MEZCLA RÁPIDA	VOLUMEN DE JARRAS	FLOCULACIÓN	AGUA CLARIFICADA				
	Tiempo: 53 s		Tiempo: 11 min	CLARIFICACIÓN				
	Velocidad: 163 rpm	1000 ml	Velocidad: 48 rpm	Tiempo: 1,47 h				
	Hipoclorito de calcio 7,4 mg/l	Tiempo de formación del floculo (min)	Índice de Wilcomb	Color (U.C.)	Turbiedad (NTU)	pH	Aluminio (mg/l)	Cloro residual (mg/l)
	Policloruro de aluminio (mg/l)							
1	12	1,15	6	20	16,7	7,88	0,016	0,8
2	14	1,13	6	20	8,4	7,91	0,018	0,8
3	16	1,11	6	15	6,1	7,90	0,018	1,0
4	18	1,11	6	15	6,0	7,87	0,018	1,0
5	20	1,10	8	15	5,5	7,86	0,022	1,0
6	22	1,10	8	15	3,9	7,35	0,022	1,0
ÍNDICE DE WILLCOMB								
0 - Flóculo coloidal. Ningún signo de aglutinación.								
2 - Visible. Flóculo muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado.								
4 - Disperso. Flóculo bien formado pero uniformemente distribuido. (sedimenta lentamente o no sedimenta).								
6 - Claro. Flóculo de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.								
8 - Bueno. Flóculo que se deposita fácil pero no completamente.								
10 - Excelente. Flóculo que se deposita todo, dejando el agua cristalina.								
CONDICIONES DEL AGUA CLARIFICADA DE LA PLANTA								
pH	Color (U.C.)	Turbiedad (NTU)	Aluminio (mg/l)	Cloro residual (mg/l)	Policloruro de aluminio (mg/l)	Polímero (mg/l)		
7,87	15	5,8	0,020	0,8	20	0,2		

La alcalinidad y pH deben ser medidas antes y después de la prueba, a fin de establecer si existe suficiente alcalinidad o capacidad tampón del agua y si es necesario o no agregar alcalinidad y ajustar el valor de pH para obtener mejores resultados. Para medir la turbiedad residual se deja sedimentar el agua floculada y se retiran de 20 a 50 ml de sobrenadante, a una profundidad de 4 a 5 centímetros de la superficie del jarro.

3.3.2.2 Selección de la dosis adecuada de policloruro de aluminio

De acuerdo a la teoría se deduce que la dosis adecuada de policloruro de aluminio correspondiente al ensayo realizado el día 02/08/2010 (tabla 3.6) es la dosificación de 16 ppm, ya que es la muestra que presentó la mayor disminución del color, turbiedad y la floculación más satisfactoria en el tratamiento óptimo del agua cruda.

Para un caudal de 345 l/s la dosis requerida de policloruro de aluminio en kilogramo por hora es:

$$16 \text{ mg/l} \times 1 \text{ kg}/10^6 \text{ mg} \times 345 \text{ l/s} \times 3600 \text{ s/hr} = 20 \text{ kg/hr}$$

De igual modo se aplicó el mismo procedimiento para todos los demás ensayos de las tablas desde la A.14 hasta la A.25 tanto en los ensayos realizados en el laboratorio como en las condiciones de la planta, los cuales se pueden observar en la tabla 4.8.

3.3.2.3 Cálculo del porcentaje de remoción de color, turbiedad y pH en la unidad de sedimentación del ensayo de jarra realizado en el laboratorio y de la planta

Este % de remoción se aplicará para el agua clarificada tanto en el ensayo realizado en el laboratorio como en las condiciones de la planta. Para obtener este % se aplica la ecuación 3.11. Tomando como ejemplo los valores del día 02/08/2010 de la tabla 3.6 realizado en el laboratorio, en donde se puede observar que el agua cruda presenta 250 unidades de color y como para ese mismo día la dosis adecuada de policloruro de aluminio es de 16 ppm, la cual en la unidad de sedimentación posee 15 unidades de color, se aplica la ecuación 3.11 asumiendo que el valor crudo de la característica en cuestión es el valor de entrada a la unidad y el valor óptimo es ahora el valor de la unidad de sedimentación, se tiene que:

$$\% \text{ Remoción de color} = \frac{(250 \text{ UC} - 15 \text{ UC})}{250 \text{ UC}} \times 100$$

$$\% \text{ Remoción de color} = 94 \%$$

Se realizaron los mismos pasos para la remoción de turbiedad y pH, del agua clarificada de las tablas desde la A.14 hasta la A.25 tanto del ensayo realizado en el laboratorio como en las condiciones de la planta, los cuales se pueden observar en la tabla 4.8.

3.4 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ADECUADA DE POLIELECTROLITO QUE GARANTICE LA TURBIEDAD, COLOR, ALCALINIDAD Y pH DESEADO EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN

Una vez obtenida la dosis adecuada de policloruro de aluminio (tabla 4.8), se procedió a disminuir la misma para así compensarla con polielectrolito y realizar ensayos de jarras manteniendo la misma fija y variando de manera creciente la cantidad de polielectrolito. Después de finalizar el ensayo, se compararon las características fisicoquímicas obtenidas en cada experiencia, con el propósito de determinar la dosificación más adecuada en el proceso de potabilización.

3.4.1 Procedimiento

Una vez obtenida la dosis adecuada de policloruro de aluminio (tabla 4.8) se procedió a montar otro ensayo de jarra para buscar la dosis adecuada de polielectrolito, la cual consta de los siguientes pasos que se describen a continuación (Arboleda, 2000):

- Se le agregó la cantidad de hipoclorito de calcio requerida a seis muestras de un litro cada una de agua cruda.
- Seguidamente se le añade la cantidad de policloruro de aluminio adecuada (tabla 4.13) pero con dos o tres ppm menos para así compensarlo con polielectrolito.
- Luego se le agregaron cantidades crecientes de polielectrolito a las mismas muestras.
- Posteriormente, se agitaron rápidamente las mezclas (163 rpm), durante 53 segundos.
- Después se detuvo el proceso de agitación rápida y se pasó a una velocidad más lenta (48 rpm), por un tiempo de 11 minutos. Durante este proceso de mezcla lenta se observó y se anotó el tiempo cuando apareció el primer grumo, se dejó crecer, luego se detuvo la mezcla y se observó a cual dosis corresponde el mejor grumo, de acuerdo a sus características.
- Finalmente se dejó sedimentar por 1,47 hr y se tomó una muestra del sobrenadante para medir la turbiedad y el pH del agua.

Tabla 3.7 Datos del ensayo de jarra para determinar la dosis adecuada de polielectrolito del día 02/08/2010

AGUA CRUDA								
Turbiedad (NTU): 126		Alcalinidad total (mg/l): 96		pH: 7,82		Color (U.C.): 250		
JARRA Nº	MEZCLA RÁPIDA	VOLUMEN DE JARRAS	FLOCULACIÓN	AGUA CLARIFICADA				
	Tiempo: 53 s		Tiempo: 11 min	CLARIFICACIÓN				
	Velocidad: 163 rpm	1000 ml	Velocidad: 48 rpm	Tiempo: 1,47 hr				
	Hipoclorito de calcio 7,4 mg/l	Tiempo de formación del floculo (min)	Índice de Wilcomb	Color (U.C.)	Turbiedad (NTU)	pH	Aluminio (mg/l)	Cloro residual (mg/l)
	Policloruro de aluminio 14 mg/l							
	Polímero (Lipesa 1544) mg/l							
1	0,2	1,11	6	10	8,7	7,89	0,018	1,0
2	0,4	1,10	6	10	5,8	7,90	0,018	1,0
3	0,6	1,09	6	10	5,2	7,92	0,020	1,0
4	0,8	1,05	6	10	5,0	7,96	0,022	1,2
5	1,0	1,00	6	10	3,8	7,86	0,022	1,2
6	1,2	1,00	6	10	3,2	7,45	0,022	1,2
ÍNDICE DE WILLCOMB								
0 - Flóculo coloidal. Ningún signo de aglutinación.								
2 - Visible. Flóculo muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado.								
4 - Disperso. Flóculo bien formado pero uniformemente distribuido. (sedimenta lentamente o no sedimenta)								
6 - Claro. Flóculo de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.								
8 - Bueno. Flóculo que se deposita fácil pero no completamente.								
10 - Excelente. Flóculo que se deposita todo, dejando el agua cristalina.								
CONDICIONES DEL AGUA CLARIFICADA DE LA PLANTA								
pH	Color (U.C.)	Turbiedad (NTU)	Aluminio (mg/l)	Cloro residual (mg/l)	Policloruro de aluminio (mg/l)	Polímero (mg/l)		
7,87	15	5,8	0,020	0,8	20	0,2		

3.4.2 Selección de la dosis adecuada de polielectrolito

De acuerdo a la teoría se deduce que la dosis adecuada de polielectrolito correspondiente al ensayo realizado el día 02/08/2010 (tabla 3.7) es la dosificación de 0,4 ppm, ya que es la muestra que presentó la mayor disminución del color, turbiedad y la floculación más satisfactoria en el tratamiento adecuado del agua cruda.

Para un caudal de 345 l/s la dosis requerida de polielectrolito en kilogramo por hora aplicando es:

$$0,4 \text{ mg/l} \times 1 \text{ kg}/10^6 \text{ mg} \times 345 \text{ l/s} \times 3600 \text{ s/hr} = 0,5 \text{ kg/hr}$$

Se realizarón los mismos pasos para la remoción de turbiedad y pH, del agua clarificada de las tablas desde la A.26 hasta la A.27 tanto del ensayo realizado en el laboratorio como en las condiciones de la planta, los cuales se pueden observar en la tabla 4.9.

3.4.3 Cálculo del porcentaje de remoción de color, turbiedad y pH en la unidad de sedimentación del ensayo de jarra realizado en el laboratorio y de la planta

Este % de remoción se aplicará para el agua clarificada tanto en el ensayo realizado en el laboratorio como en las condiciones de la planta. Para obtener este % se aplica la ecuación 3.11. Tomando como ejemplo los valores del día 02/08/2010 de la tabla 3.7 realizado en el laboratorio, en donde se puede observar que el agua cruda presenta 250 unidades de color y como para ese mismo día la dosis adecuada de polielectrolito es de 0,4 ppm, la cual en la unidad de sedimentación posee 10 unidades de color, se aplica la ecuación 3.11 asumiendo que el valor crudo de la característica en cuestión es el valor de entrada a la unidad y el valor óptimo es ahora el valor de la unidad de sedimentación, se tiene que:

$$\% \text{ Remoción de color} = \frac{(250 \text{ UC} - 10 \text{ UC})}{250 \text{ UC}} \times 100$$

$$\% \text{ Remoción de color} = 96 \%$$

Se realizaron los mismos pasos para la remoción de turbiedad y pH, del agua clarificada de las tablas desde la A.26 hasta la A.37 tanto del ensayo realizado en el laboratorio como en las condiciones de la planta, los cuales se pueden observar en la tabla 4.9.

3.5 EXAMINAR LA CALIDAD DE LOS PRODUCTOS DE TRATAMIENTO QUÍMICO EMPLEADOS EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN

En vista de que no existe un control de calidad sobre los productos químicos (policloruro de aluminio y hipoclorito de calcio) utilizados en el proceso de potabilización, surgió la necesidad de analizar algunos parámetros fisicoquímicos de interés en el laboratorio de aguas de la planta potabilizadora José Antonio Anzoátegui, esto con la finalidad de verificar la información suministrada por el proveedor de sus respectivos reportes.

3.5.1 Análisis del policloruro de aluminio

Para la determinación de este análisis se realizaron los siguientes parámetros fisicoquímicos para verificar la calidad del mismo: presencia, aspecto, color, pH, densidad, turbiedad, porcentaje de aluminio, porcentaje de materia activa, porcentaje de Al_2O_3 , porcentaje de cloruro, y porcentaje de basicidad.

3.5.1.1 Procedimiento

Todos los parámetros se realizaron siguiendo lo establecido en la norma Covenin-3058, 2002.

o Muestreo

1. Al llegar el cargamento a la planta potabilizadora se deben tomar tres muestras de los tanques, contenedores o tambores, que contengan entre ½ litro o 1 litro, en un envase de vidrio o polietileno sin humedad.
2. Cada envase debe ser identificado con una etiqueta firmada por la persona que se encarga de hacer el muestreo, el cual puede ser un técnico de laboratorio o un personal de planta como el operador de turno ó su ayudante.

3. Una de las muestras es para ser analizada por el laboratorio de la Hidrológica, otra es para el fabricante y la última se reserva para casos de discrepancia.
4. La etiqueta contendrá los datos de captación: fecha, lugar y captador.
5. La evaluación de la muestra en el laboratorio de la Hidrológica, debe hacerse dentro de los cinco días laborables después de la recepción del producto. Se dice en lo posible debido a que muchas veces el producto al llegar a la planta se vacía directamente en el tanque de dosificación, muy pocas veces hay almacenamiento en las plantas potabilizadoras de policloruro.
6. Las muestras se deben almacenar durante un mínimo de 30 días contados a partir de la fecha de recepción del producto, o hasta el consumo total del lote.

○ **Parámetros fisicoquímicos**

Los productos policloruro de aluminio líquido, es una solución que tienen las siguientes consideraciones:

1. **Presentación:** líquido.
2. **Color:** los policloruros de aluminio líquido son soluciones claras, ligeramente ámbar.
3. **Aspecto:** líquido libre de sedimentos o materia extraña visible.
4. **pH:** el policloruro es un producto ácido, de pH menores de 4. El procedimiento para evaluar este parámetro consiste en tomar 100 ml del producto en un beaker, introducir el electrodo del medidor de pH en la muestra y realizar la lectura.
5. **Densidad:** debe encontrarse entre 1,30 g/ml a 1,34 g/ml. Para determinar este parámetro se realizaron los siguientes pasos:
 - Se ajusta la muestra a una temperatura de 25±1°C.
 - Se miden 250 ml de muestra en un cilindro graduado.
 - Luego, se introduce el densímetro y se espera a que se estabilice y se toma la lectura.
 - Si la densidad es superior a 1,336 g/ml, se ajusta agregando agua, cuyo volumen se calcula mediante la siguiente fórmula (Covenin-3058, 2002):

$$V = \left(\frac{\rho_L - \rho_R}{\rho_L - \rho_{H_2O}} \right) \times v \quad (\text{Ec. 3.25})$$

donde:

ρ_L = densidad leída (g/ml).

ρ_R = densidad requerida (g/ml).

ρ_{H_2O} = densidad del agua a 25°C (g/ml).

v = volumen de muestra (ml).

6. Turbidez: en los policloruros no debe exceder de 50 NTU. En el procedimiento de este parámetro se toma un volumen de 100 ml de muestra, se introduce en la celda del turbidímetro y se realiza la lectura.

7. Contenido de aluminio como porcentaje de Al³⁺:

- Se calcula la cantidad de muestra a utilizar según el total esperado de aluminio.
- Se pesa la muestra con una apreciación de 0,01 g, luego se transfiere a un matraz aforado de 500 ml y se diluye hasta 200 ml.

- Se adicionan 25 gotas de ácido sulfúrico concentrado y mezclar.
- Se agregan 50 ml de EDTA 0,05 M, previamente estandarizada y se mezcla.
- Se adicionan 25 ml de buffer acetato de amonio.
- Se calienta el contenido a ebullición. Continuar la ebullición por 2 a 3 minutos.
- Se enfría la solución a temperatura ambiente.
- Se adicionan varias gotas de indicador anaranjado de xilenol si es líquido y si es en polvo seco se agregan entre 0,1 a 0,2 g.
- Se titula el exceso de EDTA con sulfato de zinc previamente estandarizado. El cambio de color que se observa es de amarillo a rojo púrpura.
- Si la muestra tomada resulta muy grande, el cambio de color puede ocurrir cuando la primera gota de sulfato de zinc es adicionada. Antes esta situación, se repite el análisis usando una muestra de menor peso. Posteriormente con la ecuación 3.26 se calcula el porcentaje de aluminio (Covenin-3058, 2002):

$$\% \text{ Al} = \frac{[\text{ml EDTA} - (\text{ml ZnSO}_4 \times F_1) \times M \text{ EDTA} \times 2,698]}{\text{g de muestra}} \quad (\text{Ec. 3.26})$$

Se toma que según las especificaciones técnicas del producto, el % de Al esperado debe estar entre 12,20 a 12,70 %, por lo que se tomó 12,41 %, debido a que este es el que reporta el proveedor en sus informes de calidad, el cual se encuentra en el anexo E.1 Para el cálculo de los gramos de muestra de policloruro de aluminio se realiza a partir de la ecuación 3.27 (Covenin-3058, 2002):

$$\text{g}_{\text{policloruro de aluminio}} = \frac{6,095}{\% \text{ esperado de Al}} \quad (\text{Ec. 3.27})$$

Sustituyendo el porcentaje esperado de aluminio en la ecuación 3.27 se tiene que:

$$\text{g}_{\text{policloruro de aluminio}} = \frac{6,095}{12,41}$$

$$\text{g}_{\text{policloruro de aluminio}} = 0,4911$$

Por lo que se debe pesar aproximadamente 0,4911 g de policloruro para realizar el análisis.

El factor F_1 resulta de la estandarización del sulfato de zinc con EDTA 0,05 M utilizando la ecuación 3.28 (Covenin-3058, 2002):

$$F_1 = \frac{\text{ml EDTA}}{\text{ml ZnSO}_4} \quad (\text{Ec. 3.28})$$

Para el cual se consumió 22 ml en la titulación con ZnSO₄ y se le agregaron 25 ml de EDTA en la estandarización del sulfato de zinc con EDTA 0,05 M que al sustituirlo en la ecuación 3.28 se tiene que:

$$F_1 = \frac{25 \text{ ml}}{22 \text{ ml}}$$

$$F_1 = 1,14$$

Sustituyendo los valores de ml de EDTA, ml de ZnSO₄, la masa de muestra y la estandarización de EDTA que resultó ser 0,052 M de la tabla 3.8 en la ecuación 3.26 se tiene que:

$$\% \text{ Al} = \frac{[50 \text{ ml} - (5,5 \text{ ml} \times 1,14)] \times 0,052 \text{ M} \times 2,698}{0,5012 \text{ g}}$$

$$\% \text{ Al} = 12,24 \%$$

8. Porcentaje de materia activa y % Al₂O₃: para la determinación del Al₂O₃ se utiliza la ecuación 3.29, dada por (Quidalca, 2001):

$$\% \text{ Al}_2 \text{ O}_3 = \frac{\% \text{ Al}}{0,5294} \quad (\text{Ec. 3.29})$$

Al sustituir en la ecuación 3.29 el % Al calculado con la ecuación 3.26 se tiene que:

$$\% \text{ Al}_2 \text{ O}_3 = \frac{12,24}{0,5294}$$

$$\% \text{ Al}_2 \text{ O}_3 = 23,12 \%$$

Para la determinación de la materia activa se utiliza la ecuación 3.30, dada por (Quidalca, 2001):

$$\text{Materia activa} = \% \text{ Al}_2 \text{ O}_3 \times 2,14 \quad (\text{Ec. 3.30})$$

Al sustituir en la ecuación 3.30 el % Al₂O₃ calculado con la ecuación 3.29 se tiene que:

$$\text{Materia activa} = 23,12 \times 2,14$$

$$\text{Materia activa} = 49,48 \%$$

Tabla 3.8 Datos para determinar el porcentaje de aluminio, de cloruro y la basicidad del policloruro de aluminio suministrado por la empresa Fanacor.

Aluminio		Cloruro		Basicidad		
					Policloruro de aluminio	Blanco
Volumen de EDTA (ml)	50	Volumen de AgNO ₃ en la muestra (ml)	4,8	Masa de muestra (g)	1,7602	---
Volumen de ZnSO ₄ (ml)	5,5	Volumen de AgNO ₃ en el blanco (ml)	0	Volumen de NaOH (ml)	0,9	25,8
Masa de muestra (g)	0,5012	Masa de muestra (g)	0,1998	% Al	12,24	---

9. Porcentaje de cloruro

- Se pesan aproximadamente 0,2 g de la muestra en un vaso de precipitado de 100 ml.
- Se agregan 40 ml de agua destilada para disolver la muestra.
- Se agita con un agitador magnético.
- Se agregan 8 gotas de indicador 2,7 diclorofluoresceína 0,1% en etanol.
- Se ajusta el pH de la muestra, agregando gota a gota hidróxido de sodio 0,1 N, hasta que la solución tome un color verde fluorescente.
- Se valora la muestra con AgNO₃ 0,1 N, donde el final de la titulación, está representado por un cambio de color verde fluorescente a rosado fuerte.
- Se realiza un blanco con agua destilada. Posteriormente con la ecuación 3.31 se determina el porcentaje de cloruro (Covenin-3058, 2002):

$$\% \text{ Cloruro} = \frac{(V_m - V_b) \times N \times 3,546}{\text{g de muestra}} \quad (\text{Ec. 3.31})$$

donde:

V_m = volumen de la solución de nitrato de plata en la muestra (ml).

V_b = volumen de la solución de nitrato de plata en el blanco (ml).

N = normalidad de la solución de nitrato de plata.

Sustituyendo los valores del volumen de la solución de nitrato de plata en la muestra y en el blanco, la masa de muestra y la estandarización del nitrato de plata que resultó ser 0,099 N de la tabla 3.8 en la ecuación 3.31 se tiene que:

$$\% \text{ Cloruro} = \frac{(4,8 - 0,0) \times 0,099 \times 3,546}{0,1998 \text{ g}}$$

% Cloruro = 8,43 %

10. Porcentaje de basicidad: se consideró para este parámetro no emplear el procedimiento COVENIN, ya que, dan, muchas veces, resultados ilógicos sino que se utilizó el procedimiento de la empresa (Quidalca, 2001):

- Se toma una cantidad de muestra según la tabla 3.9.
 - Ese volumen de muestra es llevado a un erlenmeyer de 250 ml previamente tarado (pesado vacío), luego se pesa con la muestra, para conocer la cantidad de muestra en gramos.
 - Se le agregan 100 ml de agua destilada y se agita hasta disolver.
 - Se hace un blanco con agua destilada.
 - Se le agregan 10 ml de HCl 1 N.
 - Los erlenmeyer se colocan sobre la plancha de calentamiento para calentar hasta ebullición. Después de ebulir por 5 minutos, se bajan de la plancha y se dejan enfriar a temperatura ambiente.
 - Con agitación constante, se adicionan 25 ml de KF al 50 %.
- Se adicionan 4 gotas de indicador fenolftaleína y se titula con NaOH 0,5 N. El punto final viene dado por un color rosado y persiste por 1 minuto. Posteriormente con la ecuación 3.32 se calcula el porcentaje de OH dada por **(Quidalca, 2001)**:

$$\% \text{ OH} = \frac{(\text{Vb} \times \text{N NaOH}) - (\text{Vt} \times \text{N NaOH}) \times (1.7)}{\text{g de muestra}} \quad (\text{Ec. 3.32})$$

donde:

Vt = volumen de NaOH gastado en la muestra (ml).

Vb = volumen de NaOH gastado en la titulación del blanco (ml).

Tabla 3.9 Guía para tomar la cantidad de muestra para realizar la basicidad de policloruro de aluminio.

Volumen de la muestra (ml)	Aluminio esperado (%)	Basicidad esperada (%)
5	5,3-8,0	0-50
3	8,0-10,6	50-70
2	>10,6	>70

Observaciones: tomado de (QUIDALCA, 2001)

Para el cálculo del porcentaje de basicidad se aplicó la ecuación 3.33, dada por (Quidalca, 2001):

$$\% \text{ Basicidad} = \frac{(\% \text{ OH}) \times 100}{\% \text{ Al}_2\text{O}_3} \quad (\text{Ec. 3.33})$$

Sustituyendo los valores del volumen de NaOH gastado en la muestra y en el blanco, la masa de muestra de la tabla 3.8, la estandarización del NaOH que resultó ser 0,499 N y el % Al₂O₃ calculado con la ecuación 3.29 en la ecuación 3.33 se tiene que:

$$\% \text{ OH} = \frac{[(25,8 \text{ ml} \times 0,499 \text{ N}) - (0,9 \text{ ml} \times 0,499 \text{ N})] \times (1,7)}{1,7602 \text{ g}}$$

$$\% \text{ OH} = 12,00\%$$

Al sustituir el % OH calculado con la ecuación 3.32 y el del % Al₂O₃ calculado con la ecuación 3.29 en la ecuación 3.33 se tiene que:

$$\% \text{ Basicidad} = \frac{12,00 \times 100}{23,12}$$

$$\% \text{ Basicidad} = 51,90 \%$$

Todos los resultados obtenidos en esta muestra se pueden observar en la tabla 4.10.

3.5.2 Análisis del hipoclorito de calcio

Para la determinación de la calidad de este producto químico se verificó el porcentaje de cloro disponible, ya que, con este producto depende una gran parte la potabilización del agua.

3.5.2.1 Procedimiento

Todos los parámetros se realizaron siguiendo el método establecido en la norma Covenin-3664, 2002.

o Muestreo

1. Como mínimo el 5 % de los empaques o recipientes deben ser muestreados. No deben tomarse muestras de recipientes rotos.
2. El hipoclorito en forma de gránulos o pulverizados, debe muestrearse utilizando un tubo muestreador con un diámetro mínimo de 20 mm.
3. La muestra total de hipoclorito en sus formas sólidas debe pesar como mínimo 7,5 kg; debe mezclarse completamente, manual o mecánicamente, y de ella tomar tres porciones de 0,5 kg cada una. Las muestras obtenidas se colocan en recipientes de vidrios resistentes a la humedad y selladas herméticamente. Cada muestra lleva su rótulo respectivo, con la fecha y firma de la persona que realizó el muestreo. Lo anterior, debe hacerse rápida y cuidadosamente para evitar la pérdida de cloro.

4. Las muestras de hipoclorito de calcio deben dividirse cuidadosa y rápidamente en porciones de 100 g, aproximadamente. Después de mezclarse, las muestras deben almacenarse en recipientes herméticos no metálicos y mantenerse en un lugar oscuro, frío y seco, excepto cuando estas muestras se están pesando. Los recipientes permanecen cerrados para evitar la pérdida de cloro disponible.
5. La evaluación de las muestras en el laboratorio, debe hacerse inmediatamente después de la recepción del despacho.
6. Las muestras deben almacenarse durante un mínimo de 30 días a partir de la fecha de recepción del despacho, antes de proceder a eliminarlas.

○ **Porcentaje de cloro disponible**

1. Colocar 5.000 g de hipoclorito de calcio en un mostero no metálico; humedézcalo con agua destilada y tritúrelo hasta formar una pasta. Transfiera el material a un balón aforado de 1.000 ml y agregue agua destilada hasta la marca. Mezcle bien.
2. Tome 25 ml de la suspensión y transfíralos a un erlenmeyer de 250 ml.
3. Agregue aproximadamente 1 g de yoduro de potasio y unos 4 ml de ácido acético glacial, hasta hacer la suspensión ácida.
4. Titule con tiosulfato de sodio 0,1 N hasta que casi desaparece el color amarillo.
5. Agregue aproximadamente 1 ml de solución indicadora de almidón.
6. Siga la titulación hasta la desaparición del color azul. Posteriormente con la ecuación 3.34 se determina el porcentaje de cloro disponible (Covenin-3664, 2002):

$$\% \text{ Cloro disponible} = (V \times N) \times \frac{40 \times 0,03545}{W} \times 100 \quad (\text{Ec. 3.34})$$

donde:

V = volumen de tiosulfato de sodio requerido para la titulación de la muestra (ml).

N = normalidad de tiosulfato de sodio (0,1 equivalente/L).

40 = factor de dilución (1000/25).

0,03545 = peso equivalente del cloro.

W = gramos de la muestra (g).

Sustituyendo los valores de tiosulfato de sodio gastado en la titulación y la masa de la muestra que se encuentran en la tabla 3.10 en la ecuación 3.34 se tiene que:

$$\% \text{ Cloro disponible} = (23,4 \text{ ml} \times 0,1 \text{ N}) \times \frac{40 \times 0,03545}{4,998 \text{ g}} \times 100$$

$$\% \text{ Cloro disponible} = 66,39 \%$$

Todos los resultados obtenidos en esta muestra se pueden observar en la tabla 4.10.

Tabla 3.10 Datos para determinar el porcentaje de cloro disponible en el hipoclorito de calcio de la empresa Industrial Tamara.

Hipoclorito de calcio	Masa de muestra (g)	Volumen de Tiosulfato de sodio (ml)
Industrial Tamara	4,998	23,4

3.6 CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE COAGULANTE, POLIELECTROLITO Y CLORO MEDIANTE LA REALIZACIÓN DE BALANCE DE MATERIA QUE SE UTILIZAN EN ÉPOCA DE LLUVIA EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN

Para calcular la cantidad de coagulante (policloruro de aluminio de la empresa Fanacor), y cloro (hipoclorito de calcio de la empresa Industrial Tamara), en el agua sedimentada de los ensayos de jarra y del proceso de potabilización de la planta realizado en la sección 3.4.1 se empleó un balance de masa global de aluminio y cloro, asumiendo que el caudal que entra al sistema es constante (345 l/s), donde se tomó en consideración la cantidad de aluminio y cloro residual en la salida del agua sedimentada y la cantidad de aluminio contenido en el policloruro de aluminio, así como también la cantidad de cloro en el hipoclorito de calcio como por ejemplo se toman los datos correspondientes al ensayo de jarra efectuado el día 02 de agosto de 2010 (tabla 3.7) como se aprecia en la figura 3.4.

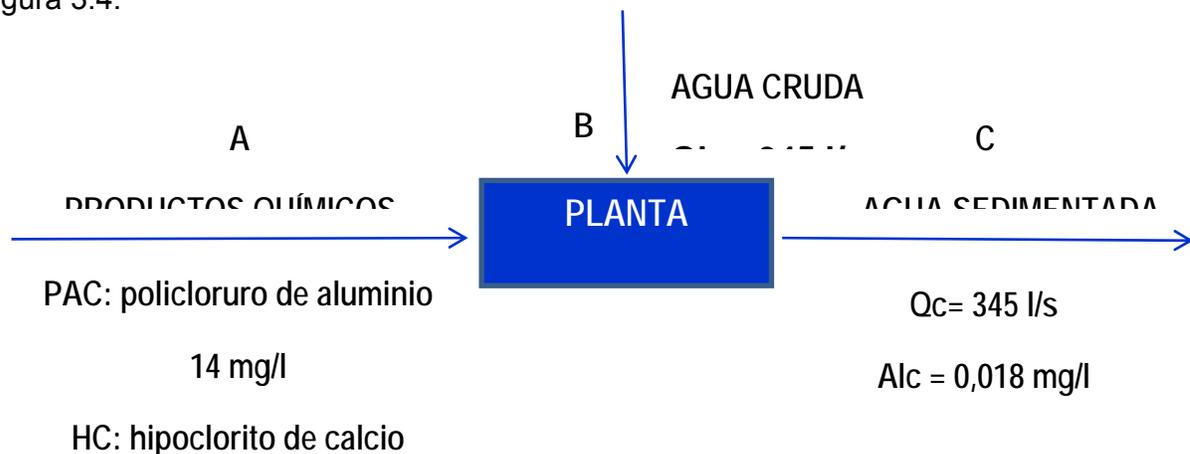


Figura 3.4 Balance de masa del proceso de potabilización de la planta convencional de estructura modular “José Antonio Anzoátegui”

Las corrientes de entrada son A y B, y la de salida C, las cuales se definen como:

- **A:** corriente de aplicación de los productos químicos, donde se aplican 14 mg/l de policloruro de aluminio de la empresa Fanacor y 7,4 mg/l de hipoclorito de calcio de la empresa Industrial Tamara. El policloruro de aluminio de esta empresa presenta un 12,24 % de aluminio y el hipoclorito de calcio 66,39 % de cloro, el cual se determinó en la sección 3.5.1. y 3.5.2.
- **B:** corriente de entrada del agua cruda (río Neverí), el cual presenta un caudal de 345 l/s.
- **C:** corriente de salida del agua sedimentada con un caudal de 345 l/s, la cual posee 0,018 mg/l de aluminio residual y 1,0 mg/l de cloro residual.

3.6.1 Coagulante (policloruro de aluminio)

Para realizar un balance global en función al aluminio se utiliza la ecuación 2.14 pero se tiene en consideración que hay entrada, consumo y salida de coagulante, no hay generación, pero éste genera al flóculo, el cual es su objetivo, por lo que la generación de coagulante se considera cero, de tal modo a sustituir las corrientes en la ecuación 2.14 se tiene que:

$$PAC \times Q_a = Q_c \times Al_c + Al_{\text{consumido}}$$

Sustituyendo los valores se tiene que:

$$\frac{14 \text{ mg PAC}}{1 \text{ H}_2\text{O}} \times \frac{375 \text{ l H}_2\text{O}}{\text{s}} \times \frac{0,1224 \text{ mg Al}}{1 \text{ mg PAC}} = \frac{0,018 \text{ mg Al}}{1 \text{ H}_2\text{O}} \times \frac{375 \text{ l H}_2\text{O}}{\text{s}} + Al_{\text{consumido}}$$

$$Al_{\text{consumido}} = 584,98 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$$

La cantidad consumida de aluminio es 584,98 mg por segundo, a través de esta cantidad se determina la cantidad consumida de Policloruro de aluminio (PAC):

$$PAC = 584,98 \frac{\text{mg}}{\text{s}} \times \frac{1 \text{ mg PAC}}{0,1224 \text{ mg Al}}$$

$$PAC = 4.779,25 \frac{\text{mg PAC}}{\text{s}}$$

La cantidad consumida de policloruro de aluminio es 4779,25 mg por segundo hasta la unidad de sedimentación de la planta José Antonio Anzoátegui. De igual forma se calcula el consumo de policloruro de aluminio con las diferentes dosificaciones de las tablas desde A.26 hasta la A.37, los resultados se encuentran en la tabla 4.11.

3.6.2 Cloro (hipoclorito de calcio)

A igual que el aluminio solo hay entrada, consumo y salida de cloro, en donde al sustituir los valores reportados en la figura 3.1 en la ecuación 2.14. se tiene que:

$$Hc \times Qa = Qc \times Clc + Cl_{\text{consumido}}$$

$$\frac{7,4 \text{ mg Hc}}{1 \text{ H}_2\text{O}} \times \frac{375 \text{ l H}_2\text{O}}{\text{s}} \times \frac{0,6639 \text{ mg Cl}}{1 \text{ mg Hc}} = \frac{1 \text{ mg Cl}}{1 \text{ H}_2\text{O}} \times \frac{375 \text{ l H}_2\text{O}}{\text{s}} + Cl_{\text{consumido}}$$

$$Cl = 1.349,94 \frac{\text{mg Cl}}{\text{s}}$$

La cantidad consumida de cloro es 1349,94 mg por segundo hasta la unidad de sedimentación de la planta José Antonio Anzoátegui. De igual forma se calcula el consumo de cloro con las diferentes dosificaciones de las tablas desde A.26 hasta la A.37, los resultados se encuentran en la tabla 4.11.

3.6.3 Polielectrolito (Polímero)

Según la NSF/ANSI STANDARD 60 certifica que la cantidad máxima permisible del polímero Lipesa-1544 a dosificar en el agua cruda para ser tratada en el proceso de potabilización y que no presente residual en la misma es de 20 mg/l como se puede observar en el anexo E.3, ya que si se excede el límite máximo permisible se debe realizar un análisis de monómero residual mediante el método de cromatografía, la cual es una técnica capaz de distinguir mezclas de compuestos orgánicos. De acuerdo a esto, tanto en los ensayos de jarras como en la planta la cantidad agregada máxima de este producto químico fue de 0,8 mg/l la cual se puede apreciar en la tabla 4.11, de esta manera el consumo de dicho producto es toda la cantidad dosificada.

3.7 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS, MATERIALES, SUSTANCIAS y HERRAMIENTAS

Los equipos, materiales y sustancias utilizados en los análisis realizados a las muestras, se encuentran disponibles en el laboratorio de aguas de la planta de potabilización de agua “José Antonio Anzoátegui”, ubicada en la zona industrial Los Montones de la ciudad de Barcelona – Estado Anzoátegui.

3.7.1 Equipos

- Medidor de pH. Marca Oakton, modelo pH 500 series, precisión ± 0,01, rango de medición 1 a 14.
- Turbidímetro. Marca Hach, modelo 2100, precisión ± 0,05, rango de medición 0 a 1000 NTU.
- Espectrofotómetro. Modelo Genesis 20, precisión ± 0,2 nm, rango de medición 325 a 1100 nm.
- Comparador Hellige. Rango 0 a 4 mg/l.
- Conductímetro. Marca Metrohm Herisau, modelo E527, rango de medición 1 a 100 mS, precisión ± 0,02.

- Plancha de calentamiento. Marca Sybron, modelo 2200, precisión ± 50 °C, rango de medición 0 a 700°C.
- Estufa de secado. Marca Thelco, modelo 4, precisión ± 1 °C, rango de medición 0 a 120 °C.
- Estufa de secado. Marca Memmert, rango de medición 0 a 220 °C, precisión ± 1 °C.
- Estufa de secado. Marca Memmert, rango de medición 0 a 120 °C, precisión ± 1 °C.
- Balanza. Marca Ohaus, precisión 0,1 mg, capacidad 1 kg.
- Balanza analítica. Marca Sauter, modelo D7470, precisión $\pm 0,1$ mg, rango de medición de 1 mg a 200 g.
- Baño de María. Marca Memmert, capacidad de 20 a 110 °C.
- Agitador. Marca Voxter-mixer, modelo vm 2000.
- Autoclave vertical. Marca Fanem, modelo 415, precisión $\pm 1,4$ °C, rango 100 a 143 °C y 0 a 3 kgf/cm².
- Cuenta colonia. Marca Hellige, modelo E069.
- Cronómetro. Marca Casio 1/1000 s.
- Comparador Hellige. Rango 0 a 4 mg/l.
- Comparador de color. Rango de medición 0 a 70 unidades de color, marca Hach.
- Equipo para prueba de jarras. Marca Phipps & Bird, modelo 7790-701, rango 1 a 300 rpm.
- Densímetro. Marca G & W, precisión $\pm 0,001$ g/ cm³, Rango de medición 0 a 500 ml.

3.7.2 Materiales

4. Beakers de 50, 500 y 1.000 ml.
5. Cilindros graduados de 50, 100, 500 y 1.000 ml.
6. Pizeta.
7. Buretas automáticas de 25 ml.
8. Pipetas de 1, 5, 10 y 25 ml.
9. Propipetas.
- 10.** Tubos Durhan.
11. Erlenmeyers de 100 y 250 ml.
12. Pinza para vasos de precipitados.
13. Policía de goma.
14. Frascos captadores de muestras.
15. Espátula.
16. Barra magnética.
17. Cápsulas de Petri.
18. Gradilla.
19. Jeringa Cornwall automática de 10 ml.
20. Mechero Bunsen.
21. Trípode.
22. Tubos de fermentación.
23. Tubos de dilución.
24. Barra magnética.

25. Jeringa de 60 ml.
26. Bureta graduada de 10 y 25 ml.
27. Pinzas para buretas.
28. Vidrio de reloj.
29. Recipiente de plástico de 100 y 4000 ml.
30. Frasco de vidrio con tapa ancha de 250 ml.

3.7.3 Sustancias

- Agua destilada.
- Ácido sulfúrico 0,02 N.
- Indicador mixto.
- Tiosulfato de sodio 0,1 N.
- Solución amortiguadora.
- Indicador eriocromo negro T.
- Solución EDTA 0,02 N.
- Solución de eriocromo cyanine R.
- Ácido ascórbico.
- Acetato de sodio.
- Hidróxido de sodio 1 N.
- Indicador Murexide.
- Solución de nitrato de plata 0,0141 N.
- Solución de cromato de potasio.
- Solución tampón > 10 mg/l SO₄.
- Cloruro de bario.
- Solución madre de color.
- Solución de ácido oxálico.
- Solución molibdato amónico.
- Ácido clorhídrico 1:1.
- Peróxido de hidrógeno.
- Persulfato de amonio.
- Caldo lauril triptosa.
- Agar.
- Caldo bilis verde brillante 2%.
- Ec Medium
- Almidón.
- Ioduro de potasio.
- Ácido acético glacial.
- Biyodato de potasio.
- Fosfato de sodio dibasico anhidro.
- Fosfato de potasio monobásico.
- D.P.D sulfato.
- Bicloruro de mercurio.
- Ácido salicílico.

- Policloruro de aluminio comercial de la empresa Fanacor, C.A.
- Hipoclorito de calcio comercial de la empresa Industrial Tamara, C.A.
- Polímero 1544 de la empresa Lipesa, S.A.
- Aluminio estándar.
- Solución estándar de acetato de amonio.
- Indicador anaranjado de xilenol.
- Sulfato de zinc estandarizado, aproximadamente 0,05 M.
- Indicador 2,7 diclorofluoresceína 0,1 % en etanol.
- Solución patrón de cloruro de sodio 0,1 N.
- Solución de hidróxido de sodio 1 N.
- Solución de fluoruro de potasio al 50 %.
- Indicador de fenolftalina.

3.7.4 Herramientas

- Microsoft Word 2003.
- Microsoft Excel 2003.
- Microsoft Power Point 2003.

CAPÍTULO 4

DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS FISCOQUÍMICOS Y BACTERIOLÓGICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA DURANTE LA ÉPOCA DE LLUVIA EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN, A TRAVÉS DE ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

4.1.1 Análisis fisicoquímicos

La planta José Antonio Anzoátegui actualmente presenta variaciones en el proceso de coagulación, esto debido a la falta de especificación de dosis de las sustancias químicas a utilizar, lo cual influye en la calidad del agua potabilizada, por lo que se necesita de análisis fisicoquímicos continuos de éstas. Los análisis a los que se hace referencia son de tipo parcial y total. Los parámetros fueron analizados tanto para el agua cruda como para el agua potabilizada.

Los análisis fisicoquímicos parciales son análisis diarios durante tres meses de lluvia: junio, julio y agosto, a los cuales se le aplicó distribución de frecuencia, para así determinar el porcentaje de entrada y salida de cada parámetro, ya que es una forma de expresar un número como una fracción de cien (100) por ciento, que significa “de cada 100”, y para los fisicoquímicos totales se realizó análisis bimensuales por cuatro meses, los cuales corresponden al mes de junio y septiembre, donde se verificó si cada parámetro se encontraban dentro de la norma de calidad del agua potable.

4.1.1.1 Análisis fisicoquímicos parciales: estos incluyen la medición de pH, turbidez, color, alcalinidad total, dureza total, aluminio residual, cloro residual y conductividad específica.

o pH

Este parámetro no presenta una diferencia significativa entre las muestras analizadas, como se puede observar en las figuras 4.1, 4.2 y 4.3. En los meses de junio, julio y agosto las muestras analizadas se encuentran dentro de los márgenes establecidos para agua cruda sub tipo 1B según Decreto 883 (1995) es decir, poseen valores de pH cercanos al pH neutro (7), ya que se encuentran entre un rango de 7,03 a 7,95 (4,16%-4,91%) y para el agua filtrada entre 6,98 a 7,87 (4,35%-4,82%) valores que estuvieron dentro de las normas sanitarias de calidad del agua potable entre 6,5 a 8,5 según Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 36.395 (1998), lo que significa que la concentración de iones hidronio es similar, tanto en el agua cruda como filtrada.

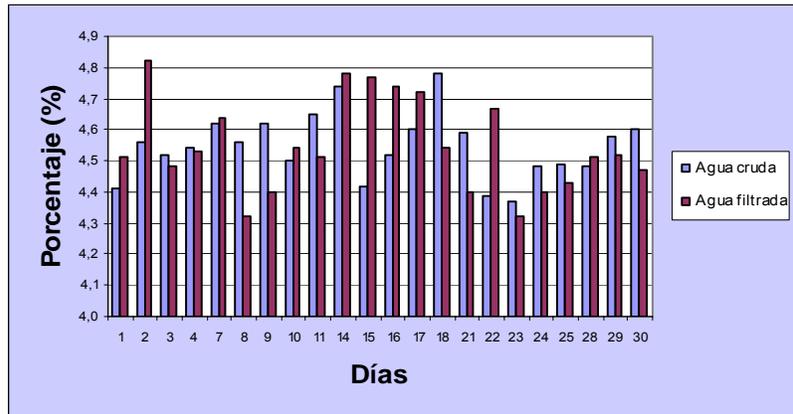


Figura 4.1 Comportamiento del % pH del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de junio de 2010.

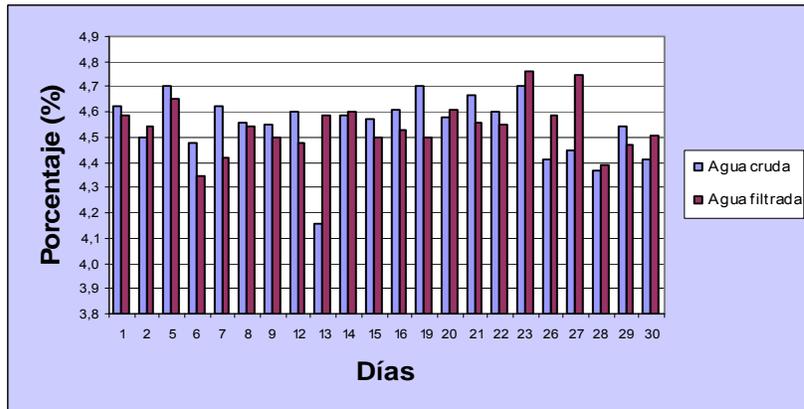


Figura 4.2 Comportamiento del % pH del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de julio de 2010.

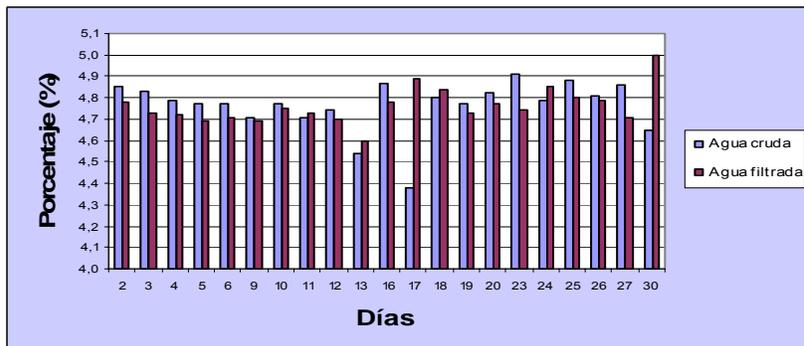


Figura 4.3 Comportamiento del % pH del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de agosto de 2010.

- Turbiedad

Este parámetro se ve afectado durante el periodo de lluvia, debido a que la presencia de materiales disueltos o en suspensión dificultan la transmisión de la luz a través del cuerpo de agua. Para el agua cruda en el mes de junio se encontró entre 101 a 339 NTU (2,74%-9,18%), en el mes de julio se midió de 50 a 228 NTU (1,78%-8,14%) y en el mes de agosto osciló entre 40 a 786 NTU (1,63%-31,99%).

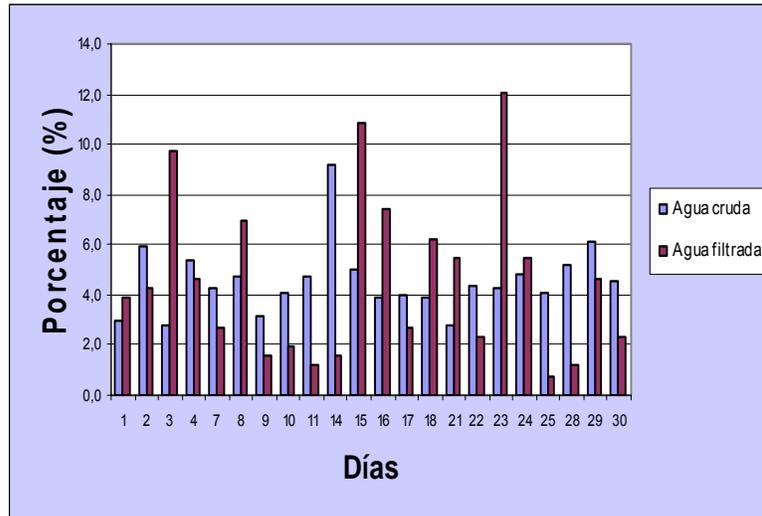


Figura 4.4 Comportamiento del % turbiedad del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de junio de 2010.

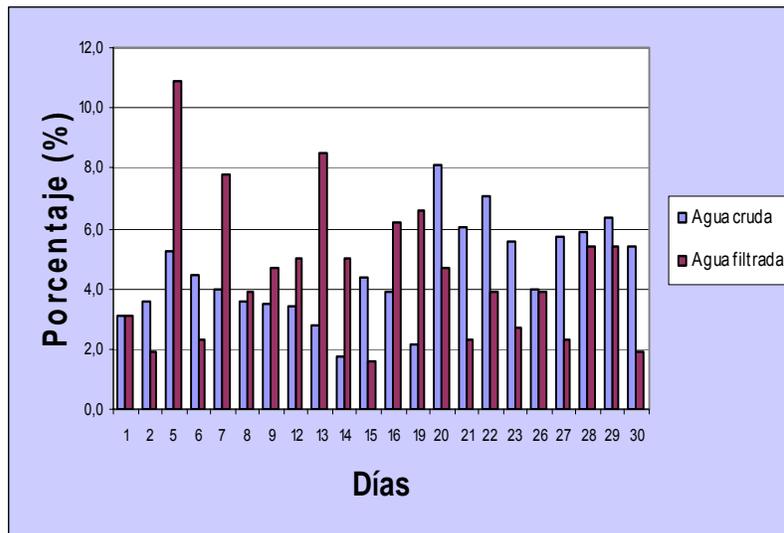


Figura 4.5 Comportamiento del % turbiedad del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de julio de 2010.

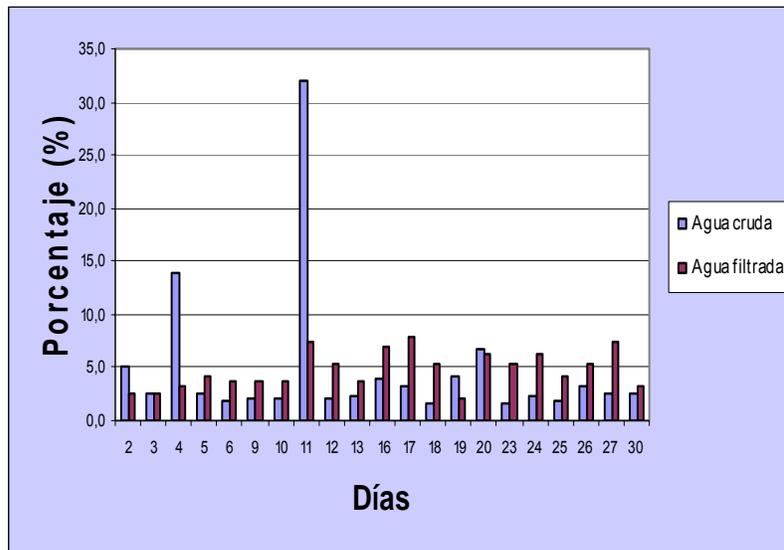


Figura 4.6 Comportamiento del % turbiedad del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de agosto de 2010.

Para el agua filtrada en los meses de junio, julio y agosto, las muestras midieron entre 31 a 4 NTU (1,55%-12,06%). Al comparar los rangos del agua cruda se puede apreciar que solo el mes de julio se encuentran dentro del rango (menor de 250 NTU) establecidos para agua cruda sub tipo 1B según Decreto 883 (1995) y el valor de turbidez en el agua filtrada estuvo fuera de norma, ya que debe estar por debajo de 5 NTU, esto es debido al periodo de lluvia como se puede observar en las figuras 4.4, 4.5 y 4.6.

○ **Color**

En base a los resultados de los análisis contenidos en las figuras 4.7, 4.8 y 4.9, se puede observar que el agua cruda en los meses de junio, julio y agosto presenta ciertas variaciones de color que se acentúan más con el cambio de estaciones, es decir, en época de lluvias. Éste varía desde 75 a 1650 unidades de color (1,29%-28,33%) encontrándose fuera de las normas establecidas para agua cruda sub tipo 1B según Decreto 883 (1995).

En el agua filtrada el valor de color para los meses de junio, julio y agosto estuvo entre 10 a 30 unidades de color (2,56%-7,69), se observa que en los meses de lluvia estuvo fuera de especificaciones según las normas sanitarias de calidad del agua potable que establece la Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 36.395 (1998) un valor máximo permisible de 15,0 unidades de color, esto debido a la calidad de agua cruda y a las condiciones operativa de la planta.

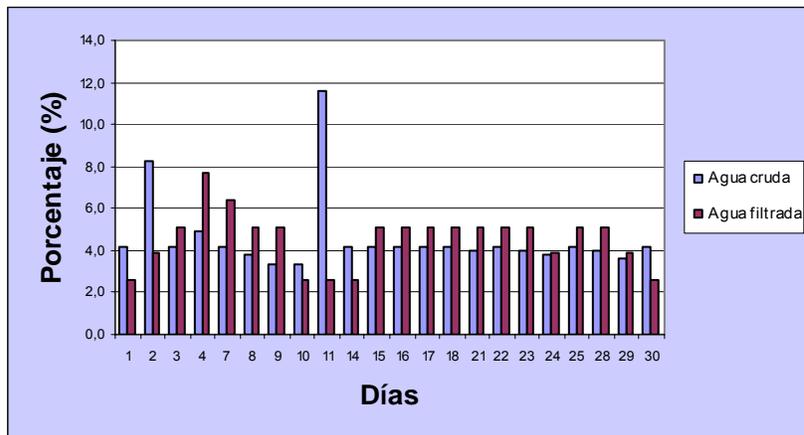


Figura 4.7 Comportamiento del % color del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de junio de 2010.

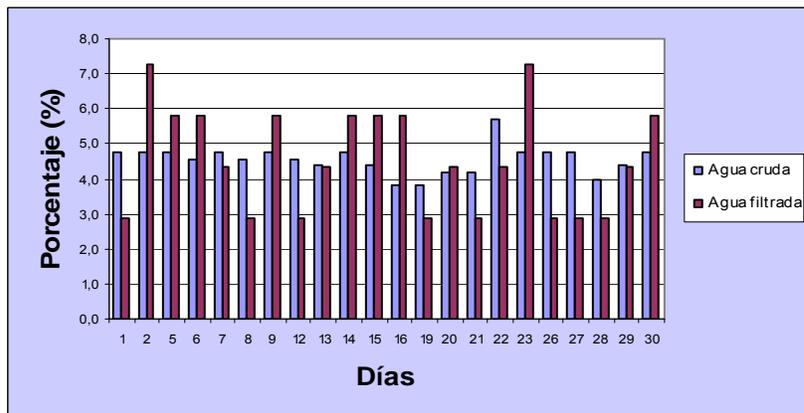


Figura 4.8 Comportamiento del % color del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de julio de 2010.

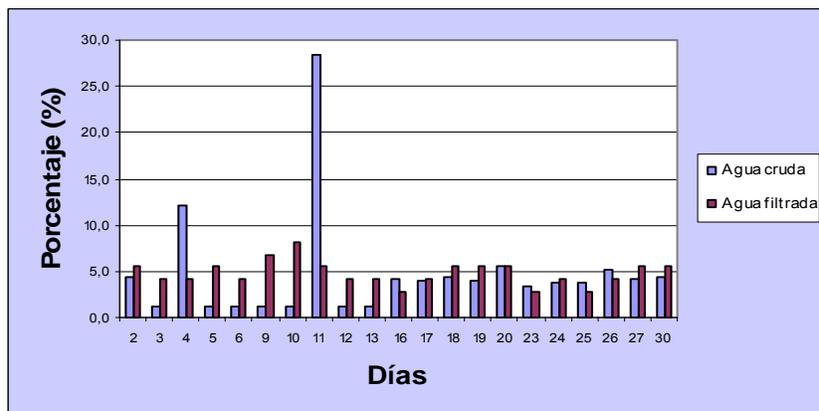


Figura 4.9 Comportamiento del % color del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de agosto de 2010.

- Alcalinidad total

Las muestras de agua cruda de los meses de junio, julio y agosto presentan un valor de alcalinidad que oscila de 80 a 120 mg/l (3,89%-5,84%) mientras que el agua filtrada para los mismos meses se encuentra entre 76 a 102 mg/l (3,96%-5,20%) como se pueden observar en las figuras 4.10, 4.11 y 4.12, ambos rangos son moderados y aunque no se tiene establecido un límite máximo de alcalinidad tanto para el agua cruda como para el agua potable, el conocer dicha medida permite mostrar que tanto el agua cruda como filtrada poseen una moderada capacidad para neutralizar ácidos.

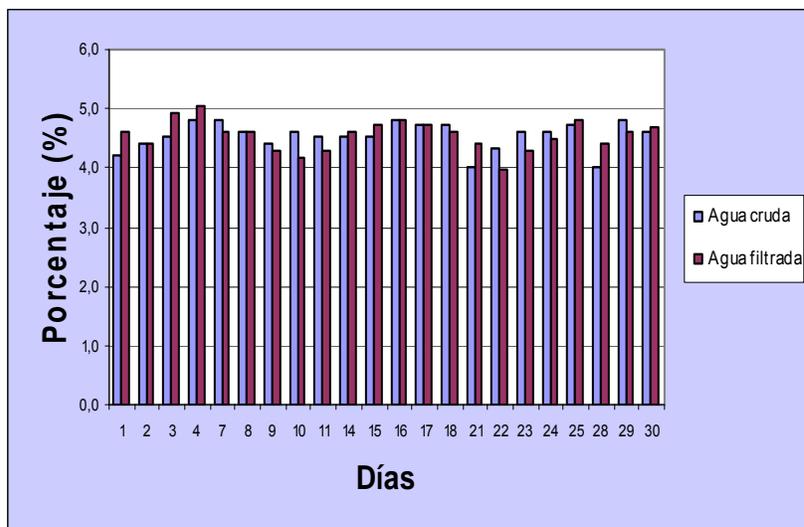


Figura 4.10 Comportamiento del % alcalinidad total del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de junio de 2010.

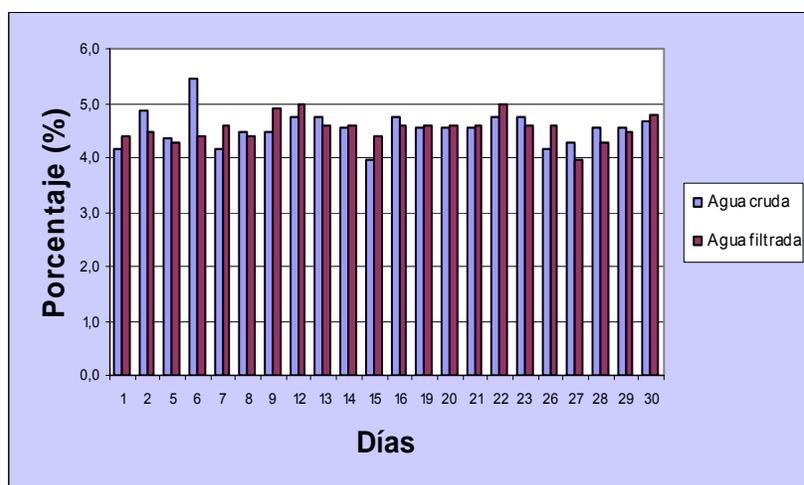


Figura 4.11 Comportamiento del % alcalinidad total del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de julio de 2010.

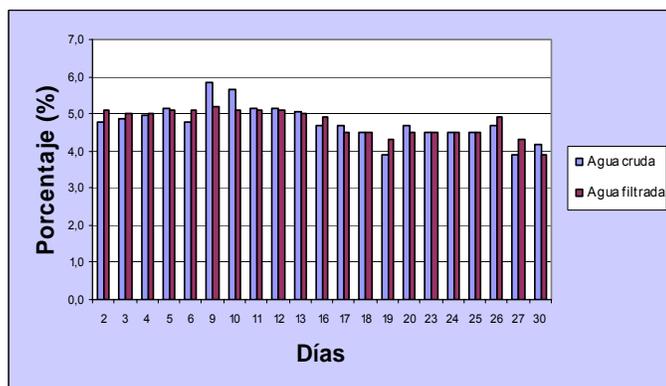


Figura 4.12 Comportamiento del % alcalinidad total del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de agosto de 2010.

○ **Dureza total**

Ésta mide en líneas generales la capacidad del agua para producir incrustaciones y es considerado un parámetro importante para determinar la potabilidad del agua junto con otras características. Según las normas establecidas para el agua cruda sub tipo 1B según Decreto 883 (1995), el límite máximo permisible para la dureza total es de 500 mg/l, al comparar las normas con los resultados de los análisis de las muestras de agua cruda de los meses de junio, julio y agosto contenidos en las figuras 4.13, 4.15 y 4.15 se puede apreciar que es un tipo de agua blanda que no requiere de ningún tipo de tratamiento para acondicionar su dureza, ya que oscila entre 106 a 140 mg/l (3,91%-5,17%).

Para el agua filtrada en los mismos meses se encontró un rango de dureza total entre 100 a 138 mg/l (3,82%-5,45%), estos valores de dureza cumplieron con las normas sanitarias de calidad del agua potable que establece la Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 36.395 (1998) un valor máximo permisible de 500 mg/l, los cuales se pueden apreciar en las figuras 4.13, 4.14 y 4.15.

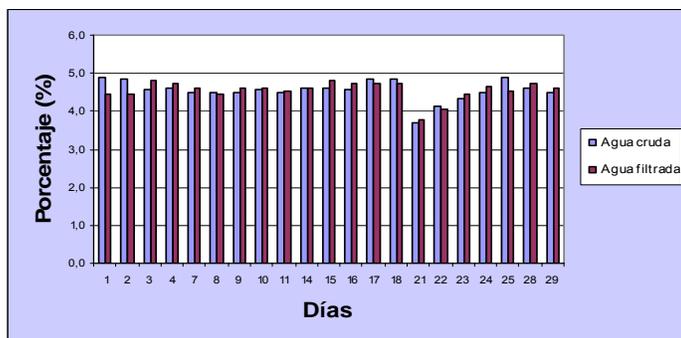


Figura 4.13 Comportamiento del % dureza total del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de junio de 2010.

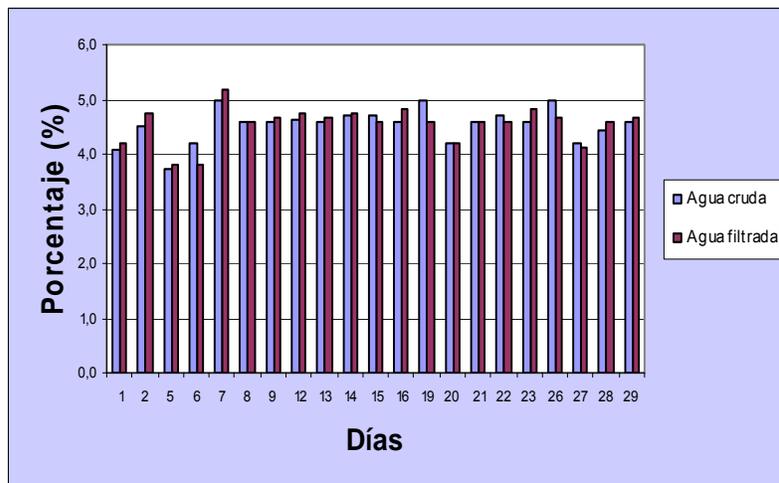


Figura 4.14 Comportamiento del % dureza total del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de julio de 2010.

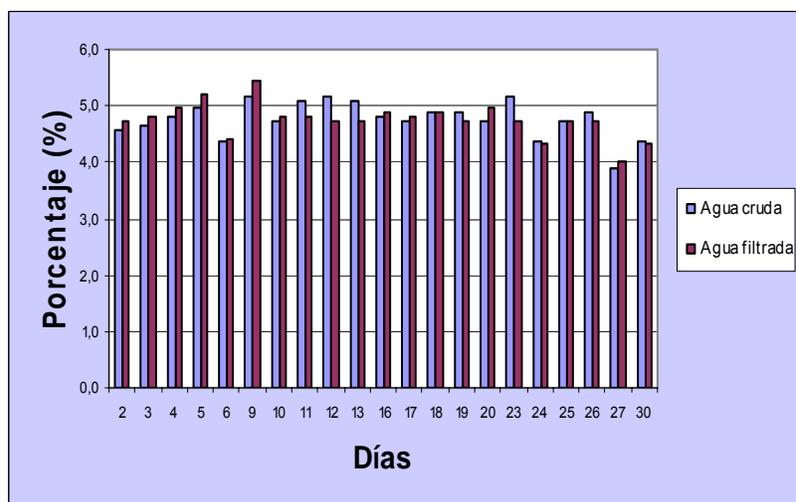


Figura 4.15 Comportamiento del % dureza total del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de agosto de 2010.

○ **Aluminio residual**

La concentración máxima de este mineral tolerable en aguas consideradas potables es de 0,2 mg/l, pero su presencia en las aguas naturales no es común, es por eso que no se le realiza análisis al agua cruda sino a la filtrada, ya que este parámetro es producto de la potabilización debido a la acción del coagulante utilizado para ayudar en la remoción de color y turbidez. En los meses de junio, julio y agosto estuvo entre 0,004 a 0,018 mg/l (1,56%-7,23%), el cual se encuentra bajo las normas sanitarias de calidad del agua potable que establece la Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 36.395 (1998) un valor máximo permisible de 0,2 mg/l como se puede observar en las figuras 4.16, 4.17 y 4.18.

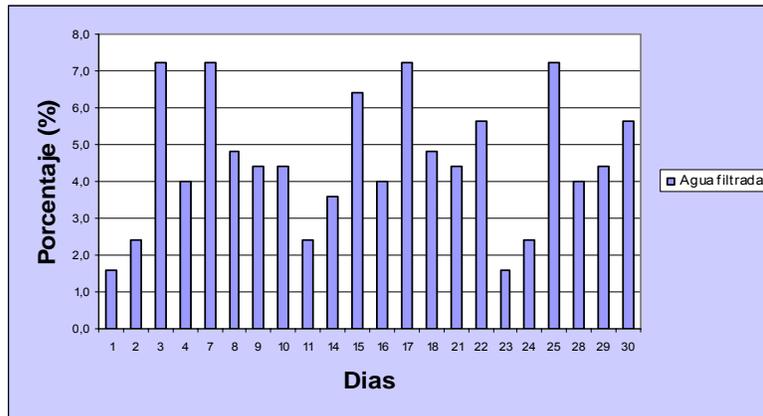


Figura 4.16 Comportamiento del % aluminio residual del agua filtrada con respecto a los días del mes de junio de 2010.

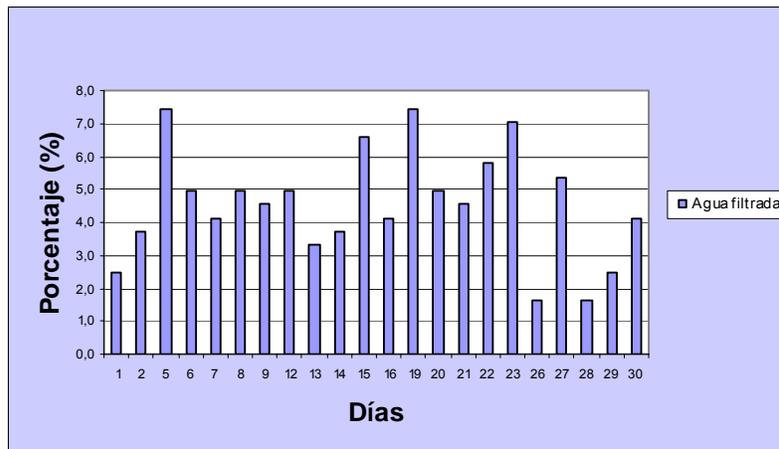


Figura 4.17 Comportamiento del % aluminio residual del agua filtrada con respecto a los días del mes de julio de 2010.

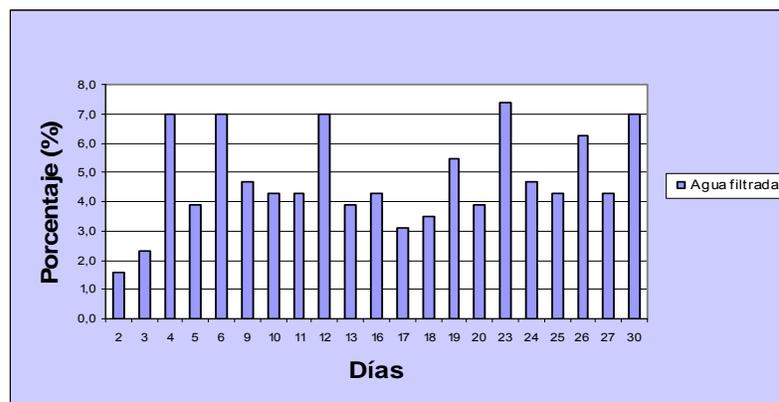


Figura 4.18 Comportamiento del % aluminio residual del agua filtrada con respecto a los días del mes de agosto de 2010.

- Cloro residual

Las muestras de agua sedimentada de los meses de junio, julio y agosto presentan un rango de cloro residual entre 0,4 a 2,2 mg/l (2,22%-11,52%) y las de las agua filtrada oscilan de 0,1 a 0,6 mg/l (1,47%-9,52%) como se puede observar en las figuras 4.19, 4.20 y 4.21. Las aguas analizadas no cumplen totalmente con el rango establecido por las normas sanitarias de calidad del agua potable, ya que, es de 0,3 a 1,0 mg/l de cloro residual, esto es debido a la calidad del agua cruda y a las condiciones operativas de la planta.

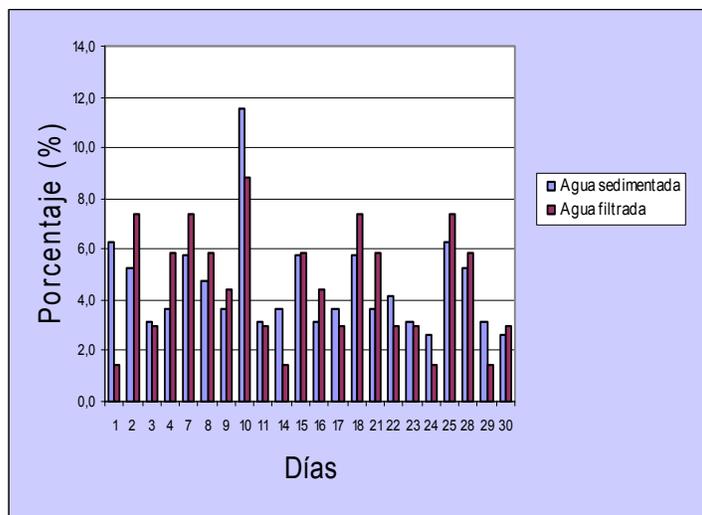


Figura 4.19 Comportamiento del % cloro residual del agua sedimentada y filtrada con respecto a los días del mes de junio de 2010.

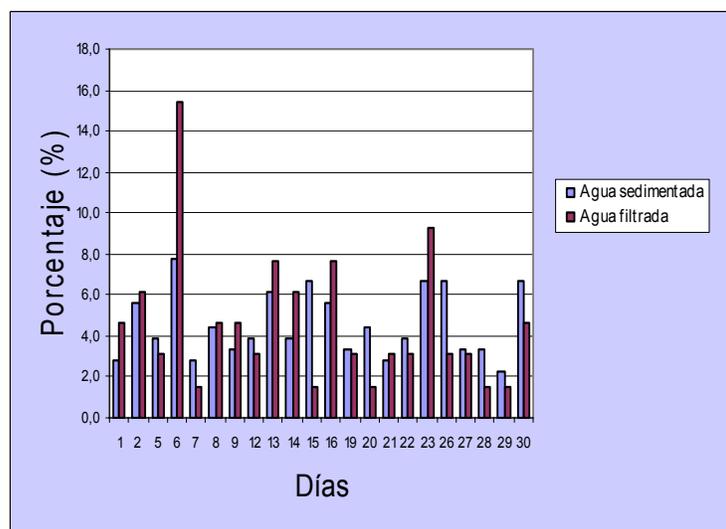


Figura 4.20 Comportamiento del % cloro residual del agua sedimentada y filtrada con respecto a los días del mes de julio de 2010.

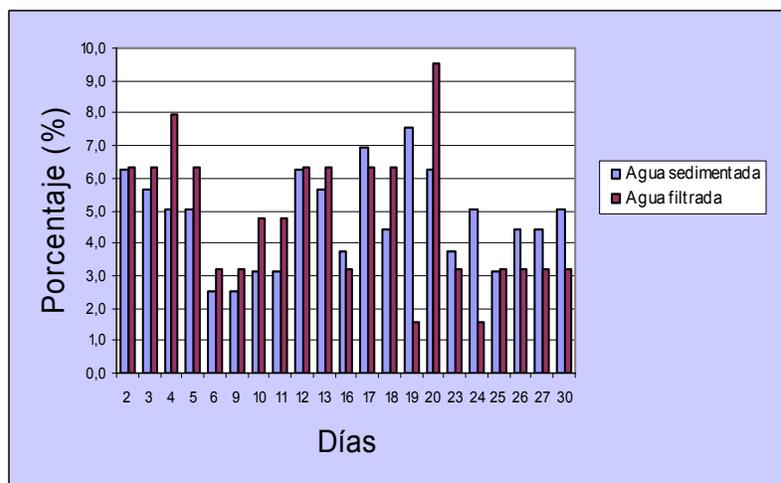


Figura 4.21 Comportamiento del % cloro residual del agua sedimentada y filtrada con respecto a los días del mes de agosto de 2010.

○ **Conductividad específica**

En cuanto a la conductividad se puede observar en las figuras 4.22, 4.23 y 4.24 los porcentajes de las muestras analizadas tanto para el agua cruda como para el agua filtrada, donde se puede apreciar que se encuentra por debajo del límite máximo permisible del agua cruda y filtrada, ya que la norma establecida del agua cruda sub tipo 1B según Decreto 883 (1995) permite 1500 μS y la norma del agua potable establece la misma cantidad permisible que la norma del agua cruda. El agua cruda para los meses de junio, julio y agosto oscila entre 172 a 334 μS (3,26%-5,56%) y para el agua filtrada se encuentra entre 230 a 350 μS (4,02%-6,10%).

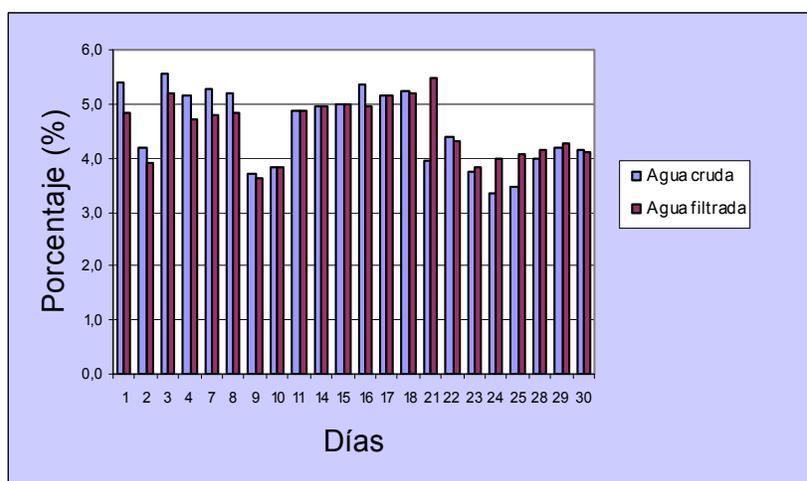


Figura 4.22 Comportamiento del % conductancia específica del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de junio de 2010.

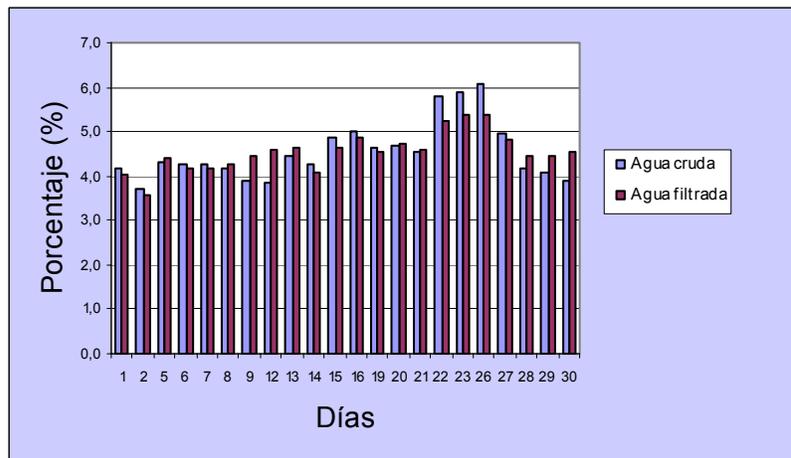


Figura 4.23 Comportamiento del % conductancia específica del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de julio de 2010.

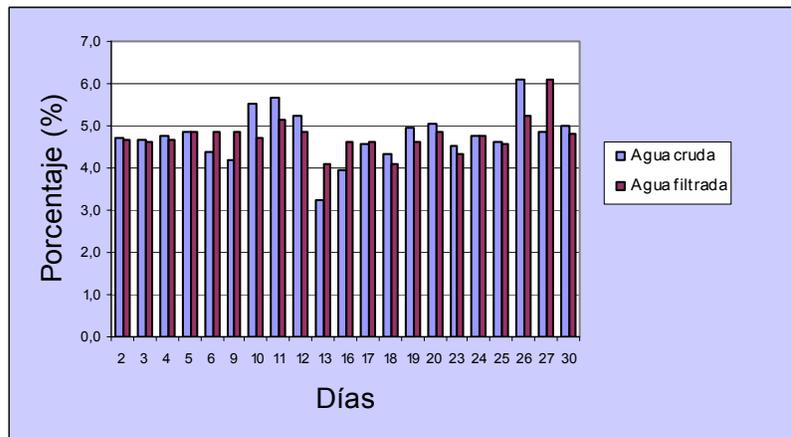


Figura 4.24 Comportamiento del % conductancia específica del agua cruda y filtrada con respecto a los días del mes de agosto de 2010.

4.1.1.2. Análisis fisicoquímicos totales

Estos análisis incluyen los parámetros de alcalinidad total, dureza total, magnesio, cloruro, sulfato, nitrito, sílice, aluminio residual, color, turbidez, manganeso, conductividad específica, pH, dióxido de carbono libre y calcio. En las muestras del agua coagulada y floculada no ocurren cambios significativos en cuanto a los parámetros fisicoquímicos, ya que en estas unidades se describe una desestabilización de las partículas logrando la formación del floculo para posteriormente aglomerarse debido a las diferencias de cargas. En el mes de junio y septiembre la alcalinidad de la muestra de agua analizada fue disminuyendo al pasar por cada unidad del proceso de potabilización indicando que se encuentran moderadas para el consumo humano, a su vez la dureza total se encontró dentro de las norma de calidad establecida para el agua potable, la cual

Tabla 4.1 Resultados de los análisis fisicoquímicos totales del agua coagulada, floculada, sedimentada y filtrada durante el mes de junio de 2010

Parámetros	Agua coagulada	Agua floculada	Agua sedimentada	Calidad del agua potable		Método
				Agua filtrada	Rango y/o límites máximos permisibles*	
Alcalinidad total (mg/l)	86	84	76	56		AWWA 2320-B
Aluminio residual (mg/l)	0,018	0,016	0,016	0,011	0,2	AWWA 3500-AI-B
Calcio (mg/l)	40,8	40	39,2	37,6	200	Diferencia matemática
Cloruros (mg/l)	12	11	11	10,5	300	AWWA 4500-CI-B
Color aparente (UND) Pt-Co	20	10	10	10	15	AWWA 2120-B
Conductancia específica a 25 °C	300	292	292	295	1500	AWWA 2510-B
Dióxido de carbono libre (mg/l)	13,76	13,44	9,66	5,66		Diferencia matemática
Dureza total (mg/l)	110	106	102	92	500	AWWA 2340-C
Magnesio (mg/l)	1,92	1,44	0,96	0,24	120	Diferencia matemática
Manganeso total (mg/l)	0	0	0	0	0,1	AWWA 3500-Mn-A
Nitrito NO ₂ (mg/l)	0	0	0	0	0,03	AWWA 4500-NO2
pH	7,05	7,13	7,24	7,32	6,50-8,50	AWWA 4500-Ph-Value-B
Sílice (mg/l)	10,3	10,2	10,5	10,9		AWWA 4500-Si-D
Sulfato (mg/l)	20,4	20,7	20,5	20,1	500	AWWA 4500-SO4-E
Turbiedad (N.T.U)	15	15	10	5	5	AWWA 2130-A

Nota: (*) Norma sanitaria de calidad del agua potable según Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 36.395 (1998).

Tabla 4.2 Resultados de los análisis fisicoquímicos totales del agua coagulada, floculada, sedimentada y filtrada durante el mes de septiembre de 2010.

Parámetros	Agua coagulada	Agua floculada	Agua sedimentada	Calidad del agua potable		Método
				Agua filtrada	Rango y/o límites máximos permisibles*	
Alcalinidad total (mg/l)	92	80	76	72		AWWA 2320-B
Aluminio residual (mg/l)	0,014	0,011	0,011	0,011	0,2	AWWA 3500-AI-B
Calcio (mg/l)	41,6	36,8	35,2	32	200	Diferencia matemática
Cloruros (mg/l)	14	13	11	11	300	AWWA 4500-CI-B
Color aparente (UND) Pt-Co	25	20	10	5	15	AWWA 2120-B
Conductancia específica a 25 °C	325	305	301	305	1500	AWWA 2510-B
Dióxido de carbono libre (mg/l)	14,72	10,17	7,68	9,15		Diferencia matemática
Dureza total (mg/l)	108	98	100	94	500	AWWA 2340-C
Magnesio (mg/l)	0,96	1,44	2,88	3,36	120.00	Diferencia matemática
Manganeso total (mg/l)	0	0	0	0	0,1	AWWA 3500-Mn-A
Nitrito NO ₂ (mg/l)	0	0	0	0	0,03	AWWA 4500-NO2
pH	7,11	7,18	7,28	7,18	6,50-8,50	AWWA 4500-Ph-Value-B
Sílice (mg/l)	12,2	12	11,2	10,8		AWWA 4500-Si-D
Sulfato (mg/l)	22,6	22,2	21,5	20,2	500	AWWA 4500-SO4-E
Turbiedad (N.T.U)	18	15	10	4	5	AWWA 2130-A

Nota: (*) Norma sanitaria de calidad del agua potable según Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 36.395 (1998).

presentó una disminución al pasar por cada proceso de potabilización en el mes de junio, y en el mes de septiembre fue creciendo y decreciendo pero manteniéndose en el rango permisible, como se observa en la tabla 4.1 y 4.2.

El límite máximo permisible de magnesio establecido en la norma de calidad del agua potable es 120 mg/l, al comparar ese valor máximo con los valores contenidos en las tablas 4.1 y 4.2, se observa que la concentración de magnesio en el agua sedimentada y filtrada para el mes de junio y septiembre se encuentran dentro del valor permisible como se puede constatar en las tablas 4.1 y 4.2, de igual modo sucede con el cloruro y el ión sulfato, es decir sus concentraciones oscilan muy por debajo del límite máximo establecido en la normativa.

Todos los análisis realizados con respecto al nitrito resultaron negativos, es decir, indicaron que este mineral se encuentra ausente, tanto en el agua coagulada, floculada, sedimentada y filtrada para el mes de junio y septiembre, así como también para el análisis del sílice que aunque no se tiene establecido un límite máximo de sílice para el agua potable el valor arrojado es aceptable para el consumo humano. En cuanto a los valores del aluminio residual estuvieron muy cercanos en cada etapa del proceso de potabilización pero manteniéndose en el rango permisible, como se observa en la tabla 4.1 y 4.2.

Tanto en el mes de junio como en septiembre el color y la turbiedad se ven afectadas de forma similar, aumenta durante el periodo de lluvia como se puede apreciar en la tabla 4.1 y 4.2 en las unidades de coagulación y floculación, pero al pasar por los procesos de sedimentación y filtración ya se encontraban en el valor exigido por la norma de calidad del agua potable.

Los análisis del agua coagulada, floculada, sedimentada y filtrada con respecto al magnesio resultaron negativos, es decir, indicaron que este mineral se encuentra ausente, con respecto a la conductividad se puede verificar en las tablas 4.1 y 4.2 que en ningún momento, en época de lluvia las muestras analizadas presentaron valores fuera de lo exigido por la norma de calidad del agua potable. Con respecto a los valores de pH estos estuvieron comprendidos dentro del rango exigido por la norma de calidad del agua potable tanto en el mes de junio como en el de septiembre para todas las muestras analizadas.

El dióxido de carbono va decreciendo en las diferentes etapas del proceso y aunque no se posee un valor permisible del dióxido de carbono el valor arrojado por estas muestras es considerable para el consumo humano. En las tablas 4.1 y 4.2 se observa que el mineral calcio es más abundante en las muestras coaguladas, es decir, que la dureza cálcica es mayor en las muestras coaguladas que en las muestras floculadas, sedimentadas y filtradas. Pero de igual modo se encuentran cumpliendo con las exigencias de la norma de calidad del agua potable.

4.1.2 Análisis bacteriológicos

Estos permiten conocer la presencia de organismos vivos que sirven de indicadores del nivel de contaminación de las aguas, en otras palabras este tipo de análisis ayuda a

determinar si son o no aptas las aguas para uso y consumo humano. En las tablas C.12, C.13 y C.14 se encuentran los resultados de los análisis bacteriológicos realizados en los meses de junio, julio y agosto del agua cruda y filtrada.

Al estudiar los resultados obtenidos para la muestra de agua cruda de los meses de junio, julio y agosto, se puede notar que poseen una presencia moderada de organismos heterotróficos (tablas C.12, C.13 y C.14), es decir, entre 120 a 480 ufc/1 m en el mes de junio, en julio de 180 a 360 ufc/1 ml y en agosto de 120 a 480 ufc/1 ml, mientras que el agua filtrada presenta 1 ufc/1 ml en todas las muestras analizadas del mes de junio, julio y agosto.

Por otro lado las muestras examinadas del agua cruda se encontraron presencia de coliformes fecales y totales, el mes de junio presenta entre 1700 a 16000 N.M.P./100 ml de coliformes total y desde 500 a 16000 N.M.P./100 ml de coliformes fecales, el mes de julio entre 1400 a 9000 N.M.P./100 ml de coliformes total y desde 900 a 3000 N.M.P./100 ml de coliformes fecales y en el mes de agosto entre 2200 a 16000 N.M.P./100 ml de coliformes total y desde 1400 a 16000 N.M.P./100 ml de coliformes fecales.

Estos resultados evidencian la contaminación que actualmente presenta el río Neverí como se puede observar en las tablas C.12, C.13 y C.14, en cambio el agua filtrada en estos mismos meses no presentan ningún tipo de coniformes, lo que asegura que el producto que sale de la planta desde el punto de vista bacteriológico se encuentra apto para el consumo humano.

Tabla 4.3 Valores de las variables calculadas de la prueba de chi-cuadrado del número de colonias de los meses de junio, julio y agosto de 2010.

Grupo	% Frecuencias observada (O _i)	% Frecuencias esperada (E)	(O _i - E)	(O _i - E) ² /E	X ² t
Junio	33,329	33,333	-0,004	4,8E-07	5,99
Julio	33,329	33,333	-0,004	4,8E-07	
Agosto	33,342	33,333	0,009	0,0000024	
Σ	100	100	0,001	0,0000034	

Con respecto a la prueba de chi-cuadrado se tiene que para ello se utilizaron tres grupos o categorías que son las muestras de los meses de junio, julio y agosto, esto se hizo para comparar los valores de remoción del número de colonias y de los organismos de coliformes totales y fecales de los grupos resultando de las mismas fuentes de agua cruda y filtrada. En las tablas C.15, C.16 y C.17 se presentan las remociones y promedios del número de colonias y de los organismos de coliformes totales y fecales tanto del mes de junio, julio y agosto, donde se observa que el mes que se obtuvo

mayor remoción de los organismos heterotróficos (99,596%) y coliformes totales (99,981) y fecales (99,960) fue en el mes de agosto.

Tabla 4.4 Valores de las variables calculadas de la prueba de chi-cuadrado de los organismos de coliformes totales de los meses de junio, julio y agosto de 2010.

Grupo	% Frecuencias observada (O _i)	% Frecuencias esperada (E)	(O _i - E)	(O _i - E) ² /E	X ² t
Junio	33,332	33,333	-0,001	3E-08	5,99
Julio	33,331	33,333	-0,002	1,2E-07	
Agosto	33,336	33,333	0,003	2,7E-07	
Σ	100	100	0	4,2E-07	

Tabla 4.5 Valores de las variables calculadas de la prueba de chi-cuadrado de los organismos de coliformes fecales de los meses de junio, julio y agosto de 2010.

Grupo	% Frecuencias observada (O _i)	% Frecuencias esperada	(O _i - E)	(O _i - E) ² /E	X ² t
Junio	33,331	33,333	-0,002	1,2E-07	5,99
Julio	33,326	33,333	-0,007	0,0000015	
Agosto	33,344	33,333	0,011	0,0000036	
Σ	100	100	0,002	0,0000052	

De acuerdo a la prueba aplicada, cuyos resultados se aprecian en las tablas 4.3, 4.4 y 4.5, desde el punto de vista estadístico se puede tener un 95 % de seguridad de que en los meses de junio, julio y agosto el agua se comportan de igual manera tanto en el número de colonias como en los organismos de coliformes totales y fecales, ya que $X_c^2 < 5,99$. Esto es debido a la época de lluvia, donde se experimenta el proceso de dilución en el río y se disminuyen los parámetros.

4.2 CONSTATACIÓN DE LA DEMANDA DE CLORO QUE GARANTICE LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA

Con la finalidad de garantizar la desinfección del agua a ser consumida por la población abastecida por esta planta se realizó ensayos de demanda de cloro, ya que, la planta presenta problemas en la precloración, debido a que posee un solo clorador para las dos plantas convencionales tanto la de estructura modular como la rectangular y no se sabe cuanto se le agrega a cada planta. Estos ensayos se realizaron una vez a la semana por tres meses, los cuales corresponden los meses de julio, agosto y septiembre.

Una vez realizada la demanda se determinó los ppm (mg/l) de cloro añadido en cada envase de cada ensayo realizado, para así graficar los ppm del cloro residual obtenido vs los ppm del cloro añadido, los cuales se pueden apreciar en las figuras desde la 4.25 hasta la 4.37, y finalmente se obtuvo el punto de inflexión de cada ensayo realizado, en el cual se representa que la demanda de cloro ha sido satisfecha y que el cloro adicional aparece como cloro residual libre para asegurar la desinfección en los filtros.

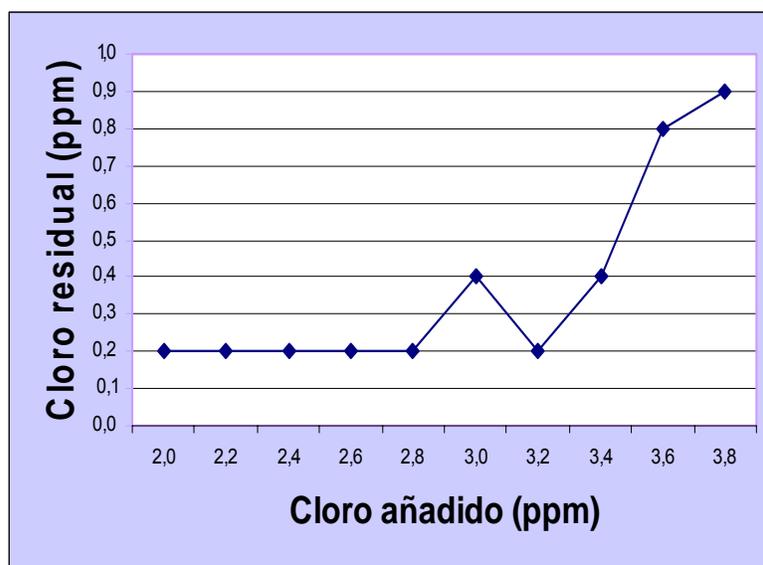


Figura 4.25 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la primera semana (07/07/2010) del mes de julio de 2010.

En la figura 4.25 se puede apreciar que existe un periodo constante de cloro residual desde la dosificación de 2 ppm hasta 2,8 ppm, ya que, después se observa una etapa que crece y decrece arrojando un punto de inflexión para una de las muestras realizadas de 3,2 ppm con un cloro residual libre de 0,2 ppm. Después del punto de inflexión comienza una etapa de crecimiento, que indica que el cloro libre residual disponible aumenta en proporción directa con la cantidad de cloro dosificada.

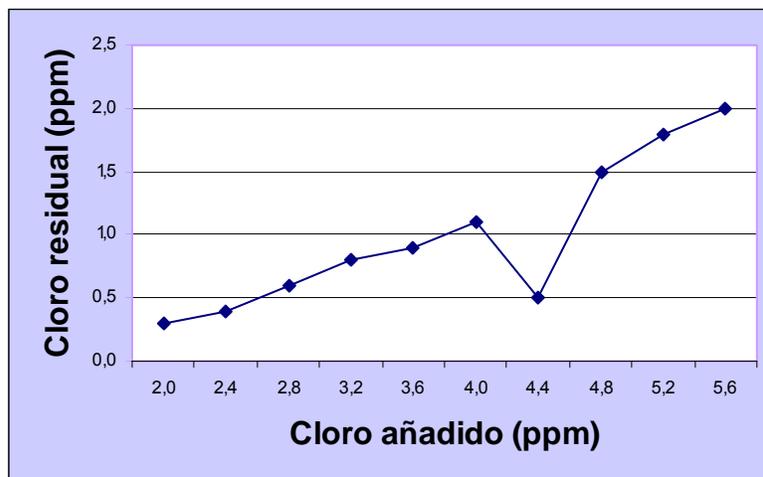


Figura 4.26 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la segunda semana (14/07/2010) del mes de julio de 2010.

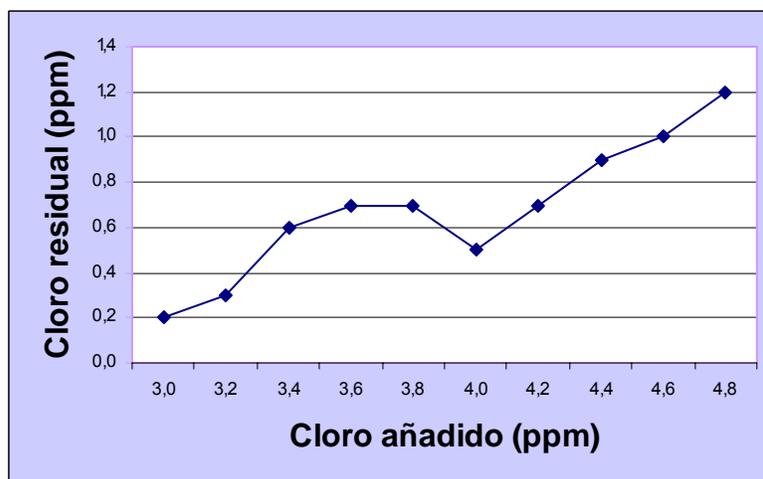


Figura 4.27 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la tercera semana (21/07/2010) del mes de julio de 2010.

En las figuras 4.26 y 4.27 es evidente que se presenta la etapa de destrucción del cloro por compuestos reductores, la cual está comprendida desde 0 a 2 ppm de cloro añadido para la figura 4.26 y para la figura 4.27 es de 0 a 3 ppm, posteriormente pasa a la etapa de formación de compuestos orgánicos de cloro donde se puede apreciar de 2 a 4 ppm de cloro añadido en la figura 4.26 y en la figura 4.27 es de 3 a 3,8 ppm, luego se observa la destrucción de compuestos orgánicos de cloro que es el conocido punto de inflexión que es de 4,4 ppm de dosis añadida con un cloro residual libre de 0,5 ppm para la figura 4.26 y de 4,0 ppm de dosis añadida con un cloro residual libre de 0,5 ppm para la figura

4.27 y finalmente se da la formación de cloro libre y presencia de compuestos orgánicos de cloro no destruidos.

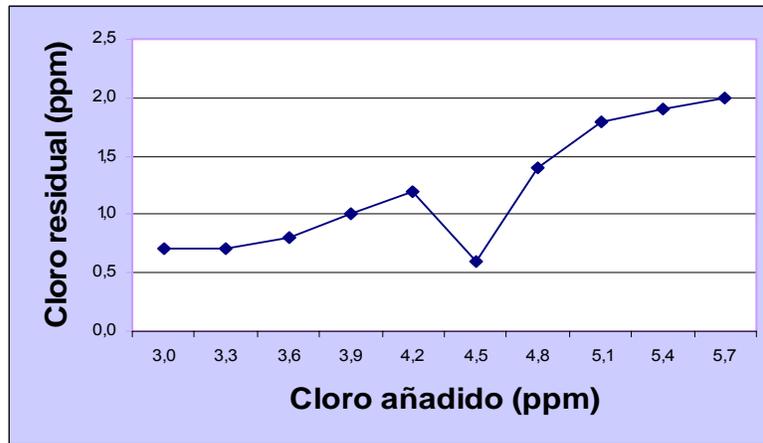


Figura 4.28 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la cuarta semana (28/07/2010) del mes de julio de 2010.

La figura 4.28 muestra que todas las dosis de cloro añadido poseen valores de cloro residual mayores a 0,5 ppm, el cual ayudara a fortalecer la desinfección en la unidad de filtración. Esta curva presenta cuatro periodos, el primero es un periodo constante, después se da una etapa de crecimiento donde el cloro residual aumenta en función a la dosificación de cloro añadida. El segundo es un periodo en donde la curva decrece, ya que, se presenta el punto de inflexión que corresponde a las coordenadas (4,5; 0,6) y el último es donde la curva vuelve a crecer en proporción a la dosificación.

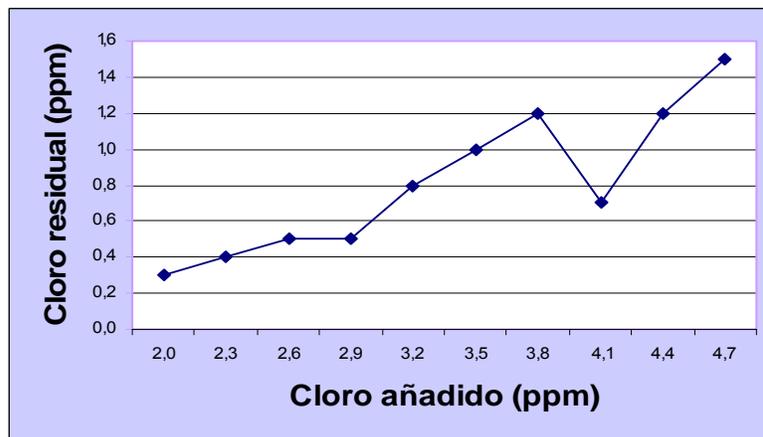


Figura 4.29 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la primera semana (04/08/2010) del mes de agosto de 2010.

En esta figura 4.29 no se presenta una estabilidad apreciable de la curva, ya que, comienza a crecer en proporción directa con la cantidad de cloro dosificado, luego se presenta una etapa constante donde arroja el mismo resultado de cloro residual así se aumente la dosificación, después aumenta de nuevo en función a los ppm añadido, posteriormente se da el punto de inflexión (4,1; 0,7 ppm) y finalmente se aprecia la formación de cloro libre y presencia de compuestos orgánicos de cloro no destruidos.

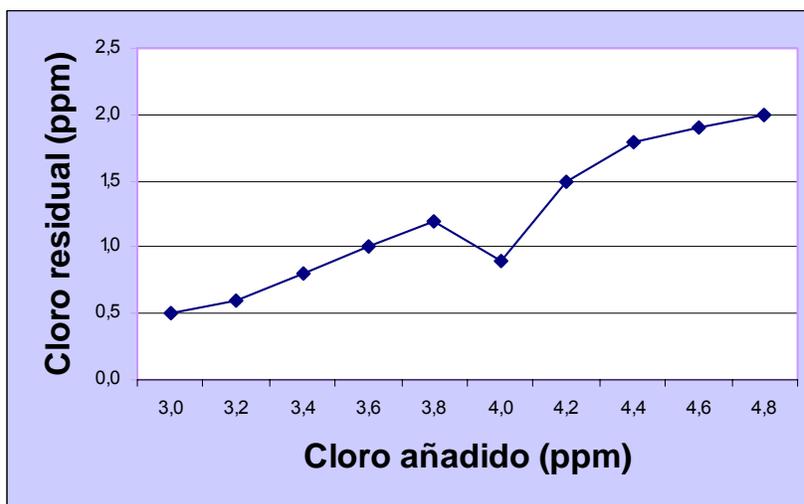


Figura 4.30 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la segunda semana (11/08/2010) del mes de agosto de 2010.

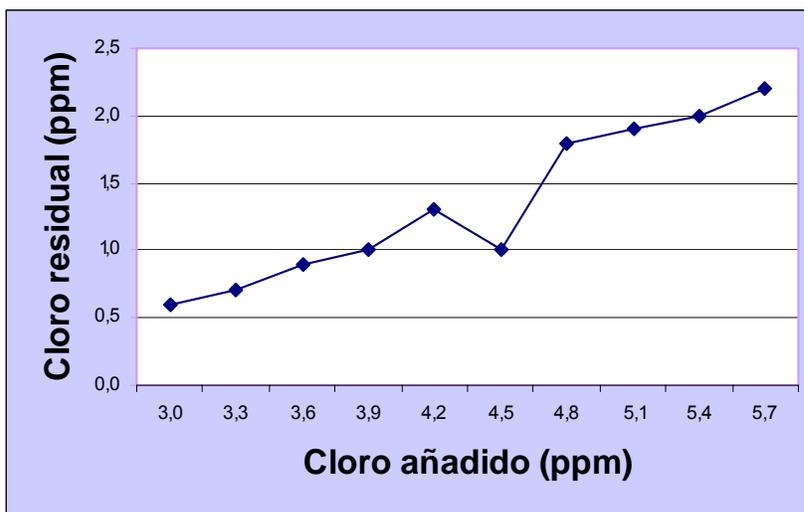


Figura 4.31 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la tercera semana (18/08/2010) del mes de agosto de 2010.

En estas dos figuras 4.30 y 4.31, la curva presenta los mismos comportamientos que las figuras 4.26 y 4.27, a diferencia que los valores del punto de inflexión varían, que es de 4,0 ppm de dosis añadida con un cloro residual libre de 0,9 ppm para la figura 4.30 y de 4,5 ppm de dosis añadida con un cloro residual libre de 1,0 ppm para la figura 4.31.

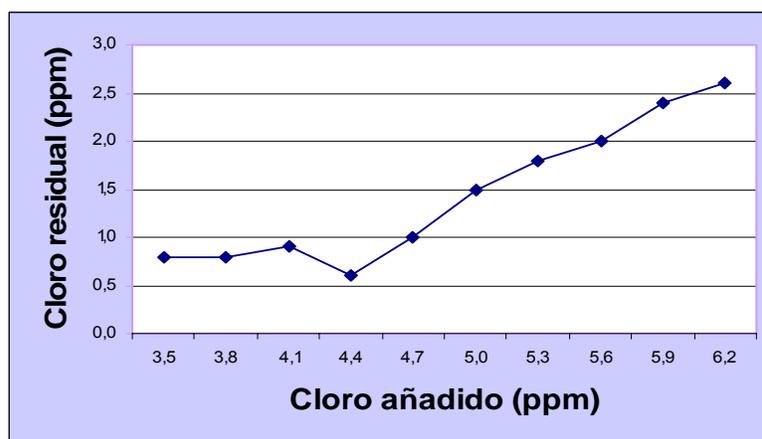


Figura 4.32 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la cuarta semana (25/08/2010) del mes de agosto de 2010.

En la figura 4.32 se puede observar que el punto de la demanda, en la cual la oxidación de los productos del amoniaco es completa es el punto de inflexión, que corresponde a las coordenadas de 4,4 ppm de dosificación de cloro con 0,6 ppm de cloro residual libre.

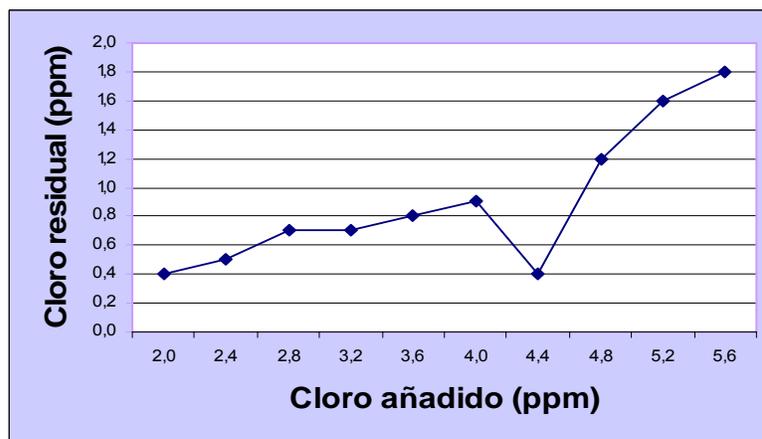


Figura 4.33 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la primera semana (01/09/2010) del mes de septiembre de 2010.

En estas dos figuras 4.33 y 4.34, la curva presenta los mismos comportamientos que la figura 4.29, a diferencia que los valores del punto de inflexión varían, que es de 4,4 ppm

de dosis añadida con un cloro residual libre de 0,4 ppm para la figura 4.33 y de 3,8 ppm de dosis añadida con un cloro residual libre de 0,5 ppm para la figura 4.34.

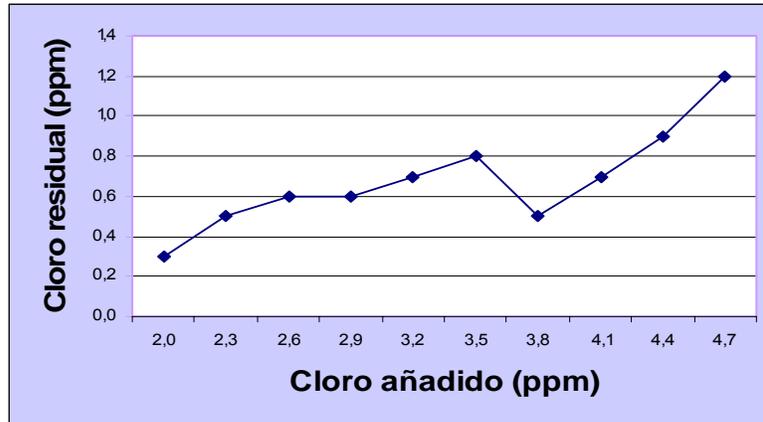


Figura 4.34 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la segunda semana (08/09/2010) del mes de septiembre de 2010.

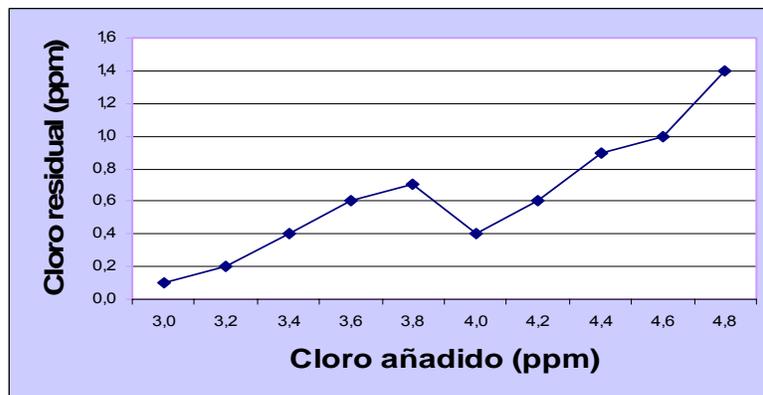


Figura 4.35 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la tercera semana (15/09/2010) del mes de septiembre de 2010.

La figura 4.35 demuestra que la dosificación de cloro de 3 ppm y 3,2 ppm presentan valores muy bajos de cloro residual, mientras que el punto de inflexión correspondiente es 4,0 ppm de dosificación añadida y 0,4 ppm de cloro residual, pero para asegurar una buena calidad de agua potable se le debe suministrar un poco más de dosis.

En la figura 4.37 se puede notar que se requiere más dosificación de cloro que la figura 4.36 para destruir los compuestos orgánicos de cloro, el cual es el punto de inflexión para la figura 4.36 que es de 4,2 ppm de dosis añadida con un cloro residual libre de 0,4 ppm y para la figura 4.37 es de 4,7 ppm de dosis añadida con un cloro residual libre de 0,6 ppm. Esto se debe a que el agua no posee las mismas características, ya que se encuentra en un periodo de lluvia.

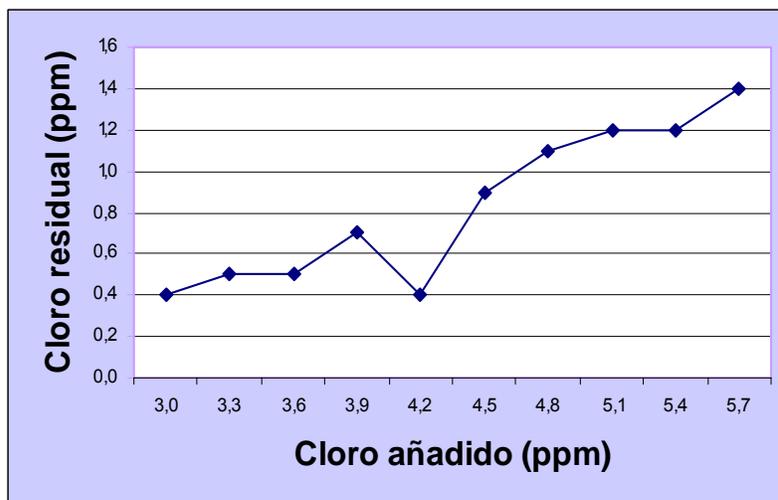


Figura 4.36 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la cuarta semana (22/09/2010) del mes de septiembre de 2010.

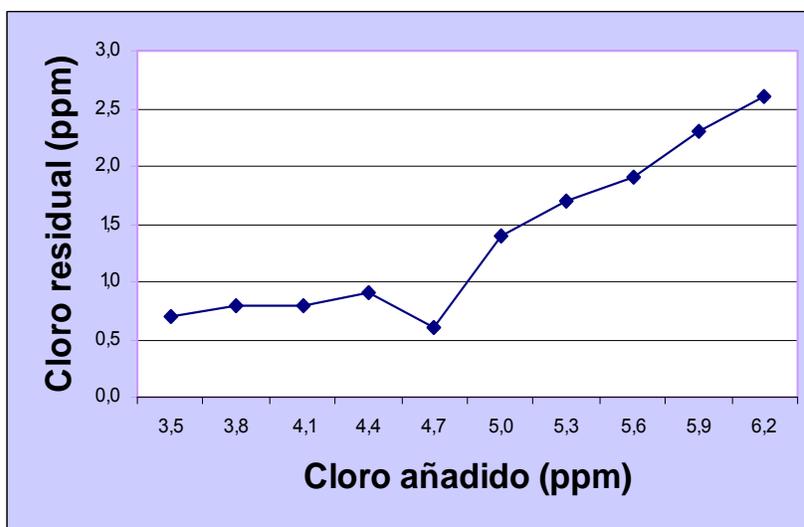


Figura 4.37 Representación gráfica de cloro residual vs cloro añadido de la quinta semana (29/09/2010) del mes de septiembre de 2010.

La tabla 4.6 muestra los puntos de inflexiones que se arrojaron en cada ensayo de demanda de cloro realizado al agua cruda durante los meses de julio, agosto y septiembre, en la cual se aprecia un aumento en el mes de agosto de la dosificación de cloro con respecto a los otros dos meses, ya que en ese mes es el de lluvia más fuerte.

Tabla 4.6 Punto de inflexión obtenido de la prueba de demanda de cloro en los meses de julio, agosto y septiembre de 2010.

Fecha	Punto de inflexión		Cloro añadido (kg/h)
	Cloro añadido (mg/l)	Cloro residual (mg/l)	
07/07/10	3,2	0,2	4,0
14/07/10	4,4	0,5	5,5
21/07/10	4,0	0,5	5,0
28/07/10	4,5	0,6	5,6
04/08/10	4,1	0,7	5,1
11/08/10	4,0	0,9	5,0
18/08/10	4,5	1,0	5,6
25/08/10	4,4	0,6	5,5
01/09/10	4,4	0,4	5,5
08/09/10	3,8	0,5	4,7
15/09/10	4,0	0,4	5,0
22/09/10	4,2	0,4	5,2
29/09/10	4,7	0,6	5,8

4.3 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ADECUADA DE COAGULANTE A TRAVÉS DE UNA SIMULACIÓN QUE GARANTICE EL GRADIENTE DE VELOCIDAD OPERACIONAL EN ÉPOCA DE LLUVIA DE LA PLANTA

En la actualidad el proceso de dosificación de policloruro de aluminio a emplear en época de lluvia presenta ciertas variaciones, esto debido a que los operadores no realizan ensayos de jarras para constatar la cantidad que deben añadir de este producto químico, cuando el agua cruda posee características fisicoquímicas difíciles de tratar, como por ejemplo valores altos de turbiedad y color, lo cual ha influido en la calidad del agua potabilizada, por lo que se necesita determinar la dosis adecuada de este coagulante primario a través de ensayos de jarras que garanticen el gradiente operacional con que esté trabajando la planta.

Para cumplir con este objetivo, primero se calculó los tiempos de retención de cada proceso para así determinar la dosis adecuada del coagulante por medio de la aplicación de la prueba de jarras en el laboratorio en donde se constató que estos cumplen con los tiempos que se requieren en una planta potabilizadora de tipo convencional, donde los valores del proceso de coagulación, floculación y clarificación es de: 53 s, 11 min y 1,47 h, mientras que el gradiente de velocidad en el proceso de coagulación (mezcla rápida) es de 163 rpm, el cual no se adapta dentro del rango permisible para dicha planta en cambio en el proceso de floculación (mezcla lenta) si se encuentra dentro del rango que debe poseer una planta de este tipo, ya que es 48 rpm, los cuales se pueden apreciar en la tabla 4.7.

En los ensayos de jarras se buscó la mejor dosis aplicada a la menor dosificación que dejará, al terminar la prueba, una turbiedad residual en el agua clarificada cercana a seis (6) NTU y un color de quince (15) UC para que al pasar por los filtros llegue a obtener su valor máximo permisible de turbiedad que es cinco (5) NTU, ya que, el color se encuentra cumpliendo con dicho valor máximo permisible, aunque como se sabe, las normas sanitarias de calidad del agua potable que establece la Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 36.395 (1998) dictan que dicho valor de turbiedad y color es el máximo aceptable del agua que se considera apta para el consumo humano, o sea, del agua que sale de las unidades de filtración de la planta (último proceso de remoción de partículas del agua).

En la tabla 4.8 están los resultados de la prueba de jarra con el coagulante policloruro de aluminio realizado el día 02-08-2010. Para ese momento en la planta se estaba dosificando 20 ppm policloruro y 0,2 ppm de polielectrolito, para unas condiciones de agua cruda de 250 UC y 126 NTU. Debido a esto se tomaron concentraciones de 12, 14, 16, 18, 20 y 22 ppm. Se escoge como resultado adecuado la jarra donde se reproduce las condiciones de color y turbidez al final del procedimiento que es de 16 ppm, donde se reproduce un color final de 15 UC, de turbiedad 6,1 NTU y una formación de flóculo de valor 6, según el índice de Willcomb, es decir que el flóculo es claro y de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.

La cantidad a remover se incrementa según las condiciones de turbidez y color del agua cruda, es decir cuando se hace necesaria la aplicación de coagulante, esto se observa en la tabla 4.8. El día 04-08-10 el agua cruda presentaba 700 UC y 339 NTU, para el cual se monto un ensayo de jarra con dosificaciones de 20, 22, 24, 26, 28 y 30 ppm de policloruro de aluminio, ya que, en la planta se encontraba dosificando 26 ppm de coagulante primario y 0,4 de coagulante secundario, resultando 24 ppm la dosis que obtiene los resultados requeridos de color 15 UC y de turbidez 6,3 NTU aunque con las dosificaciones mayores a esta los resultados arrojados son más adecuados, se puede decir que ya con una turbiedad de 6,3 NTU se puede controlar el agua al pasar por el proceso de filtración.

Tabla 4.7 Resultado de los cálculos hidráulicos en la unidad de mezcla rápida, lenta y en la sedimentación

Mezcla rápida		Mezcla lenta		Sedimentación	
Accesorios					
Coeficiente de resistencia de la válvula mariposa.	$K_1 = 0,165$	Área del floculador	$A_f = 51,167 \text{ m}^2$	Área superficial	$A_s = 375,218 \text{ m}^2$
Coeficiente de resistencia del codo de 90°.	$K_2 = 0,333$				
Coeficiente de resistencia por dirección de codo de 90°.	$K_3 = 0,750$				
Coeficiente de resistencia total.	$K_t = 2,076$	Volumen floculador	$V_f = 227,693 \text{ m}^3$	Carga superficial	$C_s = 79,442 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$
Velocidad media.	$v = 0,927 \text{ m/s}$	Tiempo de retención	$Tr = 11,00 \text{ min}$		
Pérdida por accesorios.	$h_v = 0,0909 \text{ m}$	Velocidad media.	$v = 0,00674 \text{ m/s}$		
Tramo recto de tubería					
Número de Reynolds	$Re = 0.0000711$	Pérdida por ensanchamiento brusco	$h_e = 0,0432 \text{ m}$	Volumen sedimentador	$V_s = 1819,807 \text{ m}^3$
Rugosidad relativa	$e/d = 0,000062$				
Factor de fricción	$f = 0,019$				
Pérdida de carga por flujo de fluido	$h_L = 0,0596 \text{ m}$	Gradiente de velocidad	$G = 26,747 \text{ s}^{-1}$	Tiempo de retención	$Tr = 5274,803 \text{ s}$
Pérdida de carga total	$h_f = 0,1505 \text{ m}$				
Volumen de la tubería	$V_t = 18,343 \text{ m}^3$				
Tiempo de retención	$Tr = 53,168 \text{ s}$	Revoluciones por minutos	$N = 47,975 \text{ rpm}$		
Gradiente de velocidad	$G = 175,892 \text{ s}^{-1}$				
Revoluciones por minuto	$N = 163,67 \text{ rpm}$				

Tabla 4.8 Dosificación adecuada de policloruro de aluminio y porcentaje de remoción de turbiedad y color del agua clarificada tanto de la planta como de la prueba de jarra

Fecha	Agua clarificada de la planta						Agua clarificada de la prueba de jarra			
	Policloruro de aluminio (ppm)	Policloruro de aluminio (kg/h)	Polímero (ppm)	Polímero (kg/h)	Remoción de turbiedad (%)	Remoción de color (%)	Policloruro de aluminio (ppm)	Policloruro de aluminio (kg/h)	Remoción de turbiedad (%)	Remoción de color (%)
02/08/2010	20	25	0,2	0,2	95,397	94,000	16	20	95,159	94,000
04/08/2010	26	32	0,4	0,5	98,230	97,857	24	30	98,142	97,857
11/08/2010	30	37	0,8	1,0	98,897	99,091	34	42	99,218	99,091
19/08/2010	20	25	0,2	0,2	94,175	95,652	16	20	93,981	95,652
20/08/2010	36	45	0,4	0,5	96,606	96,875	20	25	96,364	95,313
08/09/02010	22	27	0,6	0,7	96,721	96,000	22	27	96,831	96,000
14/09/2010	38	47	0,6	0,7	99,091	98,944	34	42	99,091	98,944
22/09/2010	26	32	0,6	0,7	96,532	96,429	22	27	96,416	94,643
28/09/2010	26	32	0,6	0,7	96,000	95,000	24	30	96,541	95,000
04/10/2010	28	35	0,6	0,7	97,523	96,429	26	32	97,706	96,429
13/10/2010	26	32	0,2	0,2	96,667	96,970	22	27	97,000	96,970
21/10/2010	24	30	0,4	0,5	96,076	96,154	20	25	95,949	94,231
26/10/2010	24	30	0,6	0,7	95,743	96,667	18	22	95,946	95,000

Cuando se dosifica coagulante es porque el color y la turbidez del agua cruda son elevados y que al pasar por las diferentes unidades se le hace difícil clarificar y obtener un producto dentro de las normas de calidad. Por eso, para el día 11-08-10 se realizó un ensayo de jarra con dosis crecientes de policloruro de aluminio, las cuales eran de 26, 28, 30, 32, 34 y 36 ppm, resultando adecuada la de 34 ppm (tabla 4.8), porque arrojaba un color de 15 UC y 6,1 NTU de turbiedad mientras que en la planta dosificaban 30 ppm de coagulante primario y 0,8 ppm de polielectrolito y los resultados eran de 15 UC y 8,6 NTU, esta era para un agua cruda con 1650 UC y 786 NTU.

El día 19-08-2010 el agua cruda presentaba 230 UC y 103 NTU donde la dosis adecuada para remover esos parámetros es de 16 ppm (tabla 4.8), ya que, se montó un ensayo de jarra con los siguientes dosificaciones 12, 14, 16, 18, 20 y 22 ppm y la dosis que arrojó un color de 10 UC y una turbiedad de 6,2 NTU fue la de 16 ppm, la cual presentó un flóculo que se deposita fácil pero no completamente. Mientras que en la planta se aplicaba 20 ppm de policloruro de aluminio y 0,2 ppm de polielectrolito y los resultados obtenidos eran los mismos, de esta manera al aplicar 16 ppm se ahorra más producto químico y se obtiene el mismo resultado.

En el ensayo de jarra realizado en la planta el día 20-08-10, se tiene que las condiciones del agua cruda son 320 UC y 165 NTU. El parámetro que se tomó en consideración para tomar la dosis adecuada de coagulante fue la turbidez residual del agua sedimentada. La dosis adecuada de policloruro de aluminio fue 24 ppm (tabla 4.8), donde se obtiene un agua final con turbidez de 5,8 NTU y 10 UC, ya que, al pasarla por la unidad de filtración se obtendrá valores más bajos, los cuales cumplirán con la norma de calidad del agua potable.

El día 08-09-10 el agua cruda presentaba una turbidez de 183 NTU y un color de 250 UC para el cual se le aplicaba 22 ppm de policloruro de aluminio y 0,6 ppm de polielectrolito (tabla 4.8), donde al realizar un ensayo de jarra con las siguientes dosificaciones 16, 18, 20, 22, 24 y 26 ppm se obtuvo que aplicando 22 ppm se obtiene un floc que se deposita fácilmente pero no completamente y arroja una turbiedad de 5,8 NTU y un color de 10 UC, formándose el flóculo en 1 minuto.

En la tabla 4.8 se puede observar que la dosis de 34 ppm arroja un color de 15 UC, el cual se encuentra en el valor máximo permisible para el consumo humano, mientras que la turbidez es de 6,2 NTU y aunque no cumple con la norma de calidad del agua potable aun le falta pasar por el proceso de filtración donde esta unidad remueve un poco más este parámetro llevándolo a cumplir con la norma. Esto es para un agua que presenta una condición de entrada de 1420 UC y 682 NTU.

Al aplicar 26 ppm de policloruro de aluminio y 0,6 ppm de polielectrolito para un agua cruda que presenta las siguientes condiciones de entrada 280 UC y 173 NTU se obtiene casi la misma remoción de color y turbiedad que al aplicarle 22 ppm (tabla 4.8), el cual se demostró mediante la prueba de jarra, ya que se obtiene 15 UC y 6,2 NTU estos valores son del agua sedimentada, esto quiere decir que al pasar por la unidad de filtración los parámetros se remueven más arrojando valores que se adaptarán a la norma de calidad del agua potable y de esta manera al aplicar 22 ppm en vez de 26 ppm

de policloruro de aluminio se estaría ahorrando producto, ya que casi se obtienen los mismos resultados.

Para remover una turbiedad de 185 NTU y un color de 300 UC en la planta se aplicaban 26 ppm de policloruro y 0,6 ppm de polielectrolito (tabla 4.8) mientras que al realizar un ensayo de jarra se determinó que la dosis adecuada para remover esa turbiedad y color era la de 24 ppm, ya que el flóculo era bueno y se depositaba fácil pero no completamente y la turbiedad era de 6,4 NTU y 15 UC en el agua sedimentada, los cuales eran valores que se podían controlar en el proceso de filtración.

Para determinar la dosis adecuada del agua cruda con una turbiedad de 218 NTU y 420 UC se realizó un ensayos de jarras con dosificaciones de 22, 24, 26, 28, 30 y 32 ppm de policloruro de aluminio, ya que en la planta se aplicaban 28 ppm del coagulante primero y 0,6 ppm de polielectrolito (tabla 4.8). En donde resultó adecuada la dosis de 26 ppm arrojando una turbiedad de 5,0 NTU y 15 UC de color la cual cumple con la norma sanitaria de calidad del agua potable que establece la Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 36.395 (1998).

En el ensayo de jarra realizada el día 13-10-10, se puede determinar que la dosis adecuada para la remoción de 330 UC y 180 NTU es la de 22 ppm de policloruro de aluminio (tabla 4.8), ya que, permite obtener una turbiedad de 5,4 NTU y 10 UC del agua sedimentada.

El día 21-10-10 se aplicaba 24 ppm de policloruro y 0,4 ppm de polielectrolito (tabla 4.8) para un agua cruda de 260 UC y 158 NTU a la entrada, mientras que al realizar un ensayo de jarras de dosificaciones de 16, 18, 20, 22, 24 y 26 ppm de policloruro de aluminio se verificó que la dosis adecuada era la de 20 ppm, ya que, arrojaba una turbiedad de 6,4 NTU y 15 UC en cambio con los 24 ppm que se aplicaba en la planta se obtenían 6,2 NTU y 10 UC. Al comparar ambos resultados se nota que con 20 ppm ya el color se encuentra en el valor máximo permisible y la turbiedad al pasar por la unidad de filtración disminuye y cumplirá con la norma de calidad del agua potable que establece la Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 36.395 (1998)

Finalmente el último ensayo realizado el día 26-10-10, se determinó que la dosis de 18 ppm (tabla 4.8) es la que remueve la turbiedad del agua cruda de 148 NTU y el color de 300 UC, porque su flóculo es claro, de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud, el cual se forma en 1,03 minuto y arroja una turbiedad de 6,0 NTU y un color de 15 UC.

Posteriormente después de obtener la dosis adecuada de policloruro de aluminio en cada ensayo de jarra realizado se determinó el porcentaje (%) de remoción de color y turbidez del agua sedimentada tanto en los ensayos de jarra como en las condiciones de la planta, el cual se encuentra reportado en la tabla 4.8. Donde se puede comparar la remoción que se obtiene con las diferentes dosificaciones. Se puede observar que la mayoría de los ensayos realizados la dosis adecuada son menores a la dosis aplicada en planta excepto la del día 11-08-10, ya que, ese día la turbidez en la planta estaba saliendo fuera de especificaciones.

En la tabla 4.8 se puede apreciar que las dosis determinadas en los ensayos de jarras tanto en las remociones de color como en la de turbiedad los porcentajes obtenidos son iguales o mayores a las dosis aplicadas en planta, esto quiere decir, que si se realiza ensayos de jarras cada vez que la turbiedad presenta elevados valores se obtiene la dosis adecuada de coagulante, para así ahorrar producto y obtener los parámetros fisicoquímicos cumpliendo con las norma de calidad del agua potable.

4.4 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ADECUADA DE POLIELECTROLITO QUE GARANTICE LA TURBIEDAD, COLOR, ALCALINIDAD Y pH DESEADO EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN

Una vez obtenida la dosis adecuada de policloruro de aluminio (tabla 4.8), se procedió a determinar la dosificación de polielectrolito. Para esto, se monto de nuevo ensayos de jarras con las mismas muestras de agua utilizadas para obtener la dosis adecuada de policloruro de aluminio pero disminuyéndola dos ppm menos, ya que se le aplicará ayudante de floculación.

De este modo se explica que, la aplicación de polielectrolitos como ayudantes de floculación permite reducir la dosis de coagulante primario a utilizar. A cada dosificación de ayudante de floculación se le buscó la mejor dosis, o sea, la menor cantidad de coagulante primario junto con la cual produjo al terminar la prueba de jarra un agua con una turbiedad residual cercana a 5 NTU los cuales se reportan en las tablas 3.7 y desde la B.26 hasta la B.37.

En las tablas antes indicadas para cada combinación estudiada y día de trabajo se compararon las seis (6) dosificaciones de ayudante de floculación para determinar cual de ellas dejaba en mejores condiciones el agua en cuanto a sus características fisicoquímicas, es decir, cual producía una mayor remoción de turbiedad y color, una más alta reducción de la mejor dosis de coagulante primario, un mejor flóculo y pH, las cuales se reportaron en la tabla 4.9.

En las mejores dosificaciones de coagulante primario-ayudante de floculación resultante en los días de trabajo de cada combinación estudiada se observó que, la mayoría de las veces a medida que aumenta la turbiedad y el color del agua cruda también aumenta sus remociones que representaron un mínimo 94,175 % y máximo de 99,205 % de la turbiedad en la prueba de jarra y en las condiciones de la planta fue un mínimo 94,175 % y máximo de 99,091 % y se encuentra entre el 95,000 % y 99,394 % para el color en la prueba de jarra y en las condiciones de la planta entre 94,000 % y 99,091 %.

En la tabla 4.9 se puede observar que el ayudante de floculación junto con el coagulante primario arrojó un buen rendimiento en las características medidas del agua quedaron en mejores condiciones que cuando se aplicó el coagulante primario solo en

Tabla 4.9 Dosificación adecuada de policloruro de aluminio y polímero y porcentaje de remoción de turbiedad y color del agua clarificada tanto de la planta como de la prueba de jarra

Fecha	Agua sedimentada de la planta						Agua sedimentada de la prueba de jarra					
	Policloruro de aluminio (ppm)	Policloruro de aluminio (kg/h)	Polímero (ppm)	Polímero (kg/h)	Remoción de turbiedad (%)	Remoción de color (%)	Policloruro de aluminio (ppm)	Policloruro de aluminio (kg/h)	Polímero (ppm)	Polímero (kg/h)	Remoción de turbiedad (%)	Remoción de color (%)
02/08/2010	20	25	0,2	0,2	95,397	94,000	14	17	0,4	0,5	95,397	96,000
04/08/2010	26	32	0,4	0,5	98,230	97,857	22	27	0,6	0,7	98,407	98,571
11/08/2010	30	37	0,8	1,0	98,897	99,091	30	37	1,0	1,2	99,205	99,394
19/08/2010	20	25	0,2	0,2	94,175	95,652	14	17	0,6	0,7	94,175	95,652
20/08/2010	36	45	0,4	0,5	96,606	96,875	18	22	0,4	0,5	96,848	96,875
08/09/02010	22	27	0,6	0,7	96,721	96,000	20	25	0,4	0,5	96,612	96,000
14/09/2010	38	47	0,6	0,7	99,091	98,944	32	40	0,6	0,7	99,120	99,296
22/09/2010	26	32	0,6	0,7	96,532	96,429	20	25	0,6	0,7	96,416	96,429
28/09/2010	26	32	0,6	0,7	96,000	95,000	22	27	0,4	0,5	97,027	95,000
04/10/2010	28	35	0,6	0,7	97,523	96,429	24	30	0,4	0,5	97,156	96,429
13/10/2010	26	32	0,2	0,2	96,667	96,970	20	25	0,4	0,5	96,556	96,970
21/10/2010	24	30	0,4	0,5	96,076	96,154	18	22	0,6	0,7	96,203	96,154
26/10/2010	24	30	0,6	0,7	95,743	96,667	16	20	0,8	1,0	95,946	96,667

los respectivas días de trabajo, o sea, con valores de pH más altos, igual calidad del floculo, menor tiempo de formación del floculo y aunque la turbiedad no siempre cumplió con la norma sanitaria de calidad del agua potable que establece la Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 36.395 (1998), no es de mucha importancia, ya que, de todas formas en caso de utilizar tales dosificaciones en la planta todavía faltaría aplicarles las etapas de filtración y estabilización química para corregir a dichas variables.

4.5 EXAMINAR LA CALIDAD DE LOS PRODUCTOS DE TRATAMIENTO QUÍMICO EMPLEADOS EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN

Este estudio fue basado específicamente en las normas QUIDALCA (2001) y COVENIN-3058 y 3664 (2002), donde se han establecidos una serie de parámetros los cuales se ajustan a los productos químicos evaluados, y se pueden apreciar en la tabla 4.10.

- i. **Policloruro de aluminio:** para el análisis de este producto se evaluó la densidad, pH, % Al_2O_3 , % Al, % cloruro, % ingrediente activo, % OH, % basicidad, turbiedad, presencia, color y aspecto para verificar su calidad.
- **Densidad:** según las especificaciones técnicas la densidad debe encontrarse entre (1,332 - 1,341) g/cm, en donde el resultado obtenido para la empresa Fanacor fue 1,334 g/cm, el cual se encuentra dentro de la norma COVENIN-3058 (2002).
 - **pH:** el coagulante es ácido, es decir está dentro de la norma evaluada, esta acidez facilita la remoción de color en el agua.
 - **% Al_2O_3 :** para la determinación de este parámetro se utilizó las fórmulas dadas por la empresa QUIDALCA, donde los valores obtenidos se encuentra dentro de las especificaciones técnicas, ya que, fue de 23,12 %.
 - **% Aluminio:** este análisis se basó en los procedimientos establecidos por la norma COVENIN, en el cual se establece que el contenido de aluminio en el policloruro debe encontrarse entre (12,20 - 12,70) %. El resultado obtenido fue de 12,24 %, por lo que indica que se encuentra dentro del rango establecido.
 - **% Cloruro:** el coagulante evaluado se encuentra dentro de la norma, ya que, arrojó un valor de 8,43% y la especificación exige que debe estar entre (8,00 - 8,60) %. El procedimiento utilizado fue el de la norma COVENIN.
 - **% Ingrediente activo:** es el porcentaje del producto que puede reaccionar con el agua para clarificarla, según las especificaciones, esta debe estar entre (49,00 – 52,00) %. El producto evaluado se encontró que el porcentaje de materia activa para la empresa Fanacor es 49,48 %, la cual se encuentra dentro de la norma.
 - **% OH y basicidad:** para evaluar este método se siguieron los procedimientos de las normas de la empresa QUIDALCA. En estos procedimientos se obtiene un exceso de volumen titulado en la muestra y el blanco, los valores obtenidos de % OH es 12,00 % y de basicidad 51,90%. Los cuales se encontraron dentro de la normas de calidad para

este producto, ya que debe estar entre (0,00 - 20,00) % para el % de OH y entre (10,00 - 83,00) % para el % de basicidad.

- **Turbidez (NTU):** las especificaciones del policloruro de aluminio establece que la turbiedad de este producto no debe exceder de 50 NTU, ya que si es así, pueden inferir en el aspecto del agua a tratar. El policloruro de aluminio estudiado de la empresa Fanacor se le encontró una turbiedad de 20,40 NTU el cual indica que se encuentra dentro del rango establecido.

- **Presencia:** el policloruro de la empresa Fanacor evaluado es líquido, el cual es transportado a la planta en tambores, contenedores y gandolas para finalmente ser agregado al tanque de dosificación.

- **Color:** según la norma COVENIN-3058 (2002), el policloruro de aluminio analizado cumple con las características de esta norma, ya que es una solución clara, ligeramente ámbar.

- **Aspecto:** este producto analizado se encuentra libre de sedimentos y materia extrañas, como lo establece la norma COVENIN-3058 (2002).

Tabla 4.10 Resultado de la evaluación de la calidad del policloruro de aluminio y del hipoclorito de calcio hecha en el laboratorio de la planta José Antonio Anzoátegui.

Parámetros	Policloruro de aluminio	Especificaciones técnicas	Parámetro	Hipoclorito de calcio	Especificaciones técnicas
	Fanacor			Industrial Tamara	
Densidad a 25 °C (g/cm)	1,334	(1,332 - 1,341)*	% Cloro disponible	66,39	(65 – 70)
pH	3,81	(3,80 - 4,20)*			
% Aluminio (Al ₂ O ₃)	23,12	(23,00 - 24,00)*			
% Aluminio (p/p)	12,24	(12,20 - 12,70)*			
% Cloruro (Cl)	8,43	(8,00 - 8,60)*			
% Ingrediente activo	49,48	(49,00 - 52,00)*			
% OH	12	(0,00 - 20,00)*			
% Basicidad	51,9	(10,00 - 83,00)*			
Turbidez (NTU)	20,4	50,00 máx.*			

Nota: *Covenin-3058 (2002); *Quidalca (2001).

- ii. **Hipoclorito de calcio:** generalmente la concentración de cloro disponible es de 65 al 70 %. Para la determinación del porcentaje de cloro disponible en este producto proveniente de la empresa Industrial Tamara se utilizó la norma COVENIN-3664 (2002), donde resultó un 66,39 % de cloro disponible, el cual se encuentra cumpliendo con lo establecido por la especificación técnica.

4.6 CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE COAGULANTE, POLIELECTROLITO Y CLORO MEDIANTE LA REALIZACIÓN DE BALANCE DE MATERIA, QUE SE UTILIZAN EN ÉPOCA DE LLUVIA EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN

Para conocer el consumo de coagulante y cloro en el proceso de clarificación de la planta potabilizadora y de los ensayos de jarras realizados en la sección 3.4.1., se realizó un balance de masa global con alta y bajas dosificaciones de policloruro de aluminio de la empresa Fanacor y hipoclorito de calcio de Industrial Tamara. En cambio para el polielectrolito 1544 de la empresa Lipesa la misma cantidad dosificada es la misma cantidad consumida, ya que la NSF/ANSI STANDARD 60 certifica que la cantidad máxima permisible de este producto a dosificar en el agua cruda para ser tratada en el proceso de potabilización y que no presente residual en la misma es de 20 mg/l como se puede observar en el anexo E.3.

En la tabla 4.11 se observa que para una misma muestra de agua cruda en el ensayo de jarra los resultados de consumo tanto de coagulante y polielectrolito son menores que los de la planta potabilizadora, ya que se aplican diferentes concentraciones. También se puede apreciar en dicha tabla que la cantidad consumida de coagulante tanto en los ensayos de jarras como en la planta es muy alta, para diferentes concentraciones aplicadas, inclusive para diferente calidad de agua (color y turbiedad).

En el residual de aluminio tanto en los ensayos de jarras como en las condiciones de la planta del agua clarificada el rango de este parámetro está comprendido entre 0,012 mg/l hasta 0,024 mg/l, esto quiere decir que a diferentes dosificaciones del coagulante policloruro de aluminio de la empresa Fanacor los residuales de aluminio en el agua clarificada tiende a estar comprendido en el mismo rango cumpliendo con la norma de calidad de agua potable.

En cuanto al cloro (hipoclorito de calcio), el consumo en el agua clarificada en los ensayos de jarras está comprendido entre 845,75 mg/l hasta 1.349,94 mg/l para unas dosificaciones que va desde 5,1 mg/l hasta 7,4 mg/l. En la planta potabilizadora José Antonio Anzoátegui solo se posee un clorador que dosifica por mangueras a las dos plantas convencionales tanto la de estructura modular como la convencional, de tal modo que no se posee por separado la cantidad que se le agrega a cada planta. Pero cabe resaltar que el cloro residual obtenido en el agua clarificada tanto en la planta como en el ensayo de jarra son muy cercanos, esto quiere decir que la dosificación aplicada a esta planta modular es un valor muy cercano o en algunos casos igual a la cantidad añadida en los ensayos de jarras, ya que es la misma muestra de agua cruda.

Tabla 4.11 Consumo de policloruro de aluminio, polímero y hipoclorito de calcio en la planta José Antonio Anzoátegui para diferentes dosificaciones.

Lugar de captación	Parámetro									
	Agua cruda		Agua clarificada		Dosificaciones			Consumo		
	Color (U.C.)	Turbiedad (N.T.U)	Aluminio (mg/l)	Cloro residual (mg/l)	Policloruro de aluminio (mg/l)	Polímero (mg/l)	Hipoclorito de calcio (mg/l)	Policloruro de aluminio (mg/l)	Polímero (mg/l)	Cloro (mg/l)
Agua clarificada del ensayo de jarra	250	126	0,018	1,0	14	0,4	7,4	4.779,26	0,4	1.349,94
	700	339	0,016	0,8	22	0,6	5,9	7.544,90	0,6	1.075,37
	1650	786	0,022	1,0	30	1,0	5,8	10.287,99	1,0	983,46
	230	103	0,018	1,2	14	0,6	5,5	4.779,26	0,6	845,75
	320	165	0,016	0,9	18	0,4	5,4	6.164,90	0,4	926,35
	250	183	0,016	0,8	20	0,4	5,1	6.854,90	0,4	892,13
	1420	682	0,018	1,0	32	0,6	5,8	10.989,26	0,6	983,46
	280	173	0,012	1,2	20	0,6	5,6	6.866,18	0,6	868,65
	300	185	0,012	0,8	22	0,4	5,7	7.556,18	0,4	1.029,56
	420	218	0,012	0,8	24	0,4	5,8	8.246,18	0,4	1.052,46
	330	180	0,018	1,0	20	0,4	5,8	6.849,26	0,4	983,46
	260	158	0,014	1,0	18	0,6	6,5	6.170,54	0,6	1.143,80
	300	148	0,016	1,4	16	0,8	5,2	5.474,90	0,8	708,04
Agua clarificada de la planta	250	126	0,02	0,8	20	0,2		6.843,63	0,2	
	700	339	0,024	0,8	26	0,4		8.902,35	0,4	
	1650	786	0,024	0,8	30	0,8		10.282,35	0,8	
	230	103	0,024	1,0	20	0,2		6.832,35	0,2	
	320	165	0,018	1,0	36	0,4		12.369,26	0,4	
	250	183	0,022	1,0	22	0,6		7.527,99	0,6	
	1420	682	0,026	1,2	38	0,6		13.036,72	0,6	
	280	173	0,016	1,2	26	0,6		8.924,90	0,6	
	300	185	0,018	1,0	26	0,6		8.919,26	0,6	
	420	218	0,018	1,0	28	0,6		9.609,26	0,6	
	330	180	0,02	1,0	26	0,2		8.913,63	0,2	
	260	158	0,02	1,2	24	0,4		8.223,63	0,4	
	300	148	0,022	1,2	24	0,6		8.217,99	0,6	

4.7 CONCLUSIONES

1. Los parámetros fisicoquímicos de calidad de agua estudiados en el proceso de clarificación y filtración durante los meses de junio, julio y agosto se encuentran dentro de los márgenes establecidos por la norma de calidad de agua potable.
2. En los meses de lluvia (junio, julio y agosto) los valores medidos de color y turbidez en el agua cruda, son más altos que en los de sequía según análisis realizados en dicha época, fenómeno producido por las continuas precipitaciones que ocasionan un mayor arrastre de materia orgánica, minerales y otros produciendo una fluctuación en estos valores. Esto provoca que los meses lluviosos haya un aumento de consumo de coagulante con respecto a los meses de sequía.
3. Los resultados de los exámenes bacteriológicos desde el punto de vista estadístico arrojan que se puede tener un 95 % de seguridad de que en los meses de junio, julio y agosto el agua se comportan de igual manera tanto en el número de colonias como en los organismos de coliformes totales y fecales, ya que chi-cuadrado calculado es menor que el teórico, lo que demuestra una elevada pureza de dichas aguas que las colocan dentro de la norma establecida para aguas potables.
4. La dosis adecuada de cloro que se le debe añadir al agua cruda para garantizar la desinfección de ésta y la eliminación de microorganismos que se arrastran a la unidad de filtración está comprendida entre 3,2 mg/l a 4,7 mg/l en la época de lluvia durante los meses de julio, agosto y septiembre de acuerdo a la calidad del agua cruda y caudal de operación en la planta potabilizadora.
5. La dosificación adecuada de policloruro de aluminio oscila entre 14 mg/l hasta 32 mg/l y de polielectrolito entre 0,4 mg/l hasta 0,8 mg/l a un tiempo de retención en la mezcla rápida, lenta y clarificación de 53 s, 11 min y 1,47 h y un gradiente de velocidad en la unidad mezcla rápida de 163 rpm y 48 rpm en la lenta, de acuerdo a la calidad del agua cruda y caudal de operación en la planta potabilizadora.
6. Al examinar la calidad física y química del policloruro de aluminio de la empresa Fanacor y el hipoclorito de calcio de Industrial Tamara, se pudo observar que éstos se encuentran dentro de los márgenes de calidad establecidos por las normas Covenin-3058 y 3664.
7. En época lluviosa, el consumo de coagulante es entre 4.779,26 mg/l hasta 10.989,26 y de cloro entre 708,04 mg/l hasta 1.349,94 mg/l, ya que es necesario dosificar policloruro de aluminio y cloro para observar grandes cambios entre valores de entrada y salida de color y turbiedad del agua, en cambio el de polielectrolito no sobre pasa 1 mg/l de consumo.

4.8 RECOMENDACIONES

- Poner en funcionamiento otro dosificador de gas cloro, para separar la dosificación del mismo de la planta convencional de estructura rectangular de la planta convencional de estructura modular.
- Instalar un medidor de caudal a la entrada de la planta potabilizadora convencional de estructura modular, ya que es indispensable conocer la cantidad de agua cruda que entra para determinar exactamente la dosificación de los productos químicos necesarios en el tratamiento de agua.
- Considerar el examen del policloruro de aluminio y el hipoclorito de calcio a nivel del laboratorio.
- Realizar ensayos de jarras continuos para determinar la dosis adecuada de coagulante y polielectrolitos.
- Aplicar dosis de coagulante cuando el agua cruda tenga poco color y turbidez, esto ayuda a que el proceso de desinfección sea confiable desde el punto de vista bacteriológico.
- Analizar los parámetros fisicoquímicos sólo a las muestras de agua cruda, sedimentación y filtración para así ahorrar reactivos, ya que no ocurre cambios significativos de estos en la unidad de coagulación y floculación porque solo se describe una desestabilización de las partículas logrando la formación del flóculo para posteriormente aglomerarse debido a las diferencias de cargas.

BIBLIOGRAFIA

ACEVEDO, S. (1999). *Enciclopedia básica del conocimiento universal*. Colombia: Editorial Norma, S.A.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. (2002). *Calidad y tratamiento de agua*. Quinta edición. España: Editorial McGraw-Hil.

APHA, AWWA y WPCF. (1998). *Standard Methods for the Examination of water and Wastewater*. Edición 20, EUA: Editorial BOARD.

ARBOLEDA, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Tomo I, II. Tercera edición. Colombia: Editorial McGraw-Hil.

CARPIO, H. y RAMÍREZ, M. (2008). *Evaluación del tratamiento químico para el aumento de la capacidad de la planta potabilizadora Santa Clara*. Trabajo de grado. Dpto. de Ingeniería Química, UDO-Anzoátegui, Barcelona.

CERMEÑO, J. (1992). *Diseño de experimentos*. Fondo editorial UDO Anzoátegui.

CEPIS. (2004). *Métodos de desinfección del agua*. Disponible en: www.cepis.ops-oms.org

COVENIN 3058. (2002). *Policloruro de aluminio líquido utilizado en el tratamiento de potabilización de aguas. Requisito y método de ensayo. Anteproyecto COVENIN 3058*. Caracas.

COVENIN 3664. (2002). *Hipoclorito de calcio sólido utilizado en el tratamiento de potabilización de aguas. Requisito y método de ensayo. Anteproyecto COVENIN 3664*. Caracas.

CRANE, H. (1992). *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. Primera edición. México: Editorial McGraw-Hill.

GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA DE VENEZUELA N° 36.395. (1998). *Normas sanitarias de calidad del agua*. Capítulo III. Artículo N° 14. Caracas.

GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA DE VENEZUELA N° 5021. (1995). *Norma para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos*. Decreto N° 883. Caracas.

GUARIMATA, N. (2002). *Evaluación técnica y económica del uso de coagulantes y floculantes en una planta de tratamiento de aguas servidas*. Trabajo de grado. Dpto. de Ingeniería Química, UDO-Anzoátegui, Barcelona.

GÓMEZ, N. (2002). *Evaluación del sistema de tratamiento de agua potable del Campamento Macagua - Central Hidroeléctrica 23 de Enero*. Trabajo de grado. Dpto. de Ingeniería Química, UDO-Anzoátegui, Barcelona.

HIMMELBLAU, D. (1988). *Balances de materia y energía*. Cuarta edición. México: Editorial PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA, S.A.

KIELY, G. (1999). *Ingeniería ambiental*. Volumen Nro. 2. España: Editorial McGraw-Hill Interamericana de España.

MERRITT, F. (1984). *Manual del ingeniero civil*. Volumen III. Primera edición. México: Editorial McGraw-Hill.

LIPESA. (1998). *Tratamiento químico del agua*. Caracas: Editorial Impregraf.

NSF/ANSI STANDARD 60. (1978). *Drinking Water Treatment Chemical – Health Effects*. Disponible en: www.nsf.org/certified/pwschemicals/asp?companyname=lipesa&

PEÑA, L. (2001). *Evaluación técnica-económica del proceso de coagulación-floculación en una planta de potabilización de agua*. Trabajo de grado. Dpto. de Ingeniería Química, UDO-Anzoátegui, Barcelona.

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. Dpto. de Ingeniería Química, UDO-Anzoátegui, Barcelona.

PROYECTO MERBAR. (1998). *Curso sobre plantas de potabilización de agua para técnicos y operadores*. Mérida, Venezuela.

QUIDALCA. (2001). *Evaluación de policloruro de aluminio*. Maracay.

QUINTERO, A. (2000). *Parámetros básicos en la optimización de los procesos químicos de la potabilización de aguas*. Maracay: Editorial Sinerquim, C.A.

RIGOLA, M. (1999). *Tratamiento de aguas industriales*. México: Editorial Alfaomega.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

TÍTULO	EVALUACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE LOS PRODUCTOS QUÍMICOS UTILIZADOS EN UNA PLANTAPOTABILIZADORA DE AGUA.
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Rivas Ana karina	CVLAC: 18.280.693 E MAIL: rivasmenezes@hotmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALABRAS O FRASES CLAVES:

DOSIFICACIÓN DE PRODUCTOS QUIMICOS

DEMANDA DE CLORO

CALIDAD DEL AGUA POTABLE

ENSAYO DE JARRA

GRADIENTE DE VELOCIDAD

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

ÁREA	SUBÁREA
INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS	INGENIERÍA QUÍMICA

RESUMEN (ABSTRACT):

El presente trabajo tuvo como finalidad evaluar la dosificación de los productos químicos utilizados en la planta de potabilización de agua “José Antonio Anzoátegui”, mediante análisis estadísticos, en donde se aplicó distribución de frecuencia para los parámetros fisicoquímicos, obteniéndose que al comparar las características del agua producida con las normas sanitarias venezolanas de calidad del agua potable, estas se encuentran dentro de los parámetros máximos permisibles excepto el color y la turbiedad que en determinados días, presentaron valores fuera de especificaciones entre 5,13 % y 7,69 % para el color y entre 2,33 % y 12,06 % para la turbiedad, especialmente en época de lluvia y la prueba de chi-cuadrado para los análisis bacteriológicos lo que demostró que desde el punto de vista estadístico se puede tener un 95 % de seguridad de que en los meses de junio, julio y agosto el agua se comporta de igual manera tanto en el número de colonias como en los organismos coliformes totales y fecales, ya que $X_c^2 < 5,99$. De igual forma, para garantizar la potabilización del agua se realizó la demanda de cloro, en la cual después de un tiempo de contacto apropiado, se determinó la dosis requerida de cloro se encuentra comprendida entre 3,2 a 4,7 mg/l. En relación al estudio hidráulico se estudiaron los tiempos de retención de cada unidad y se determinó la dosis adecuada del coagulante y la combinación óptima de éste con el ayudante de floculación por medio de la aplicación de la prueba de jarras. En el laboratorio se constató que estos cumplen con los tiempos que se requieren en una planta potabilizadora de tipo convencional, donde los valores del proceso de coagulación, floculación y clarificación son de: 53 s, 11 min y 1,47 h respectivamente, mientras que el gradiente de velocidad en el proceso de coagulación (mezcla rápida) es de 163 rpm y en el de floculación (mezcla lenta) es 48 rpm. La dosis adecuada de coagulante resultó entre 14 mg/l y 32 mg/l y la de polielectrolito entre 0,4 mg/l y 0,8 mg/l en época de lluvia; y el porcentaje de remoción de color es de un 96,00 % a 99,39 % y de turbiedad desde un 94,18 % a 99,21 % del agua clarificada tanto en los ensayos de jarra como con las condiciones de la planta. La calidad del policloruro de aluminio de la empresa Fanacor y el hipoclorito de calcio de Industrial Tamara se encuentran dentro de los márgenes de calidad establecidos por las normas Covenin-3058 y 3664. El consumo de coagulante en época

de lluvia está entre 4.779,26 mg/l hasta 10.989,26 mg/l y de cloro entre 708,04 mg/l hasta 1.349,94 mg/l, ya que es necesario dosificar juntos el policloruro de aluminio y el cloro para observar grandes cambios entre los valores de entrada y salida de color y turbiedad del agua, en cambio el de polielectrolito no sobre pasa 1 mg/l de consumo.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

CONTRIBUIDORES

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
MILENA AMUNDARAIN	AS	CA	AS	TU X	JU
	CVLAC:	3.945.689			
	E_MAIL	milena.amundarain@gmail.com			
	E_MAIL				
YUVI MORENO	JU	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	12.980.821			
	E_MAIL	ycmoreno@nalco.com			
	E_MAIL				
MARITZA MILLAN	JU	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	4.009.400			
	E_MAIL	mjmillan@cantv.net			
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2011	06	09
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE: ESPAÑOL

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
Tesis. EVALUACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE LOS PRODUCTOS QUÍMICOS UTILIZADOS EN UNA PLANTAPOTABILIZADORA DE AGUA .doc	Application/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: _____

TEMPORAL: _____

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 son propiedad exclusiva de la Universidad de Oriente, y solo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento expreso del Consejo de Núcleo respectivo, quien participará al Consejo de Universidades”

AUTOR

ANA KARINA RIVAS MENESES

TUTOR
Prof. Milena Amundarain

JURADO
Prof. Maritza Millan

JURADO
Prof. Yuvi Moreno

POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS

Prof. Yraima Salas