

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



**EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA DE UNA
PLANTA POTABILIZADORA EN LA CIUDAD DE CUMANÁ ESTADO
SUCRE**

REALIZADO POR:

Br. CLARIBEL DEL VALLE MARVAL SÁNCHEZ

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO ANTE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

Puerto La Cruz, Noviembre de 2011

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



**EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA DE UNA
PLANTA POTABILIZADORA EN LA CIUDAD DE CUMANÁ ESTADO
SUCRE**

Revisado y aprobado por:

Ing. Químico Milena Amundarain
Asesor Académico

M.Sc.Ing. Industrial Cruzmila Brito
Asesor Industrial

Puerto La Cruz, Noviembre de 2011

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



**EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA DE UNA
PLANTA POTABILIZADORA EN LA CIUDAD DE CUMANÁ ESTADO
SUCRE**

Jurado calificador:

Ing. Químico Milena Amundarain, M.Sc
Asesor Académico

Ing. Químico Alexis Cova, M.Sc.

Jurado Principal

Ing. Químico Yraima Salas, M.Sc.

Jurado Principal

Puerto La Cruz, Noviembre de 2011

RESOLUCIÓN

De acuerdo al Artículo 41 del reglamento de trabajos de grado:

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

DEDICATORIA

A **DIOS** por haberme dado la vida, salud, la fuerza y la valentía para luchar por mis sueños, por haberme tomado de su mano sin soltarme ni un momento, por ser mi impulso para levantarme de mis caídas, por guiarme siempre hacia las cosas que me hacen aprender, pero sobre todo por ser mi mejor amigo, por haberme regalado una familia que ha sido mi apoyo y buenos amigos que sin duda alguna son muy importantes para mí. Sin ti señor jamás hubiese podido vencer el reto y lograr alcanzar esta meta.

A mi **Mami Clara**, por ser la mejor mamá del mundo, por tu amor infinito, por tu apoyo y confianza en mí, por haberme dado alas para volar. Gracias por no faltarme y por haberme enseñado que ante las adversidades solo debemos sonreír y seguir adelante, que no hay nada imposible de lograr cuando tenemos fe en DIOS y en nosotros mismos. Este es mi regalo para ti mami, te amo.

A mi **Papi Félix**, por haber estado siempre conmigo, porque sé que siempre has estado pendiente de mí y porque a pesar de nuestras diferencias te quiero.

A mis **hermanos Félix y Feilys**, por respetarme, por siempre confiar y creer en mí, los adoro, de ustedes también he aprendido mucho.

A mi amiga **Marisabel**, por estar conmigo en los buenos y malos ratos, por abrirme las puertas de tu casa y haberme permitido formar parte de tu familia. Eres especial para mí. Te quiero amiga.

A mi amigo **Carlos**, por regalarme tu amistad, por estar siempre allí, por apoyarme y por darme ánimos para llegar hasta aquí tú también eres especial para mí. Te quiero mucho.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS, por estar siempre a mi lado, por no desampararme, por bendecirme y no faltarme nunca.

A ti mami **Clara** por darme la fuerza necesaria para seguir siempre adelante, por confiar totalmente en mí, por estar a mi lado por ser además de mi madre mi mejor amiga, por enseñarme tantas cosas, por ser única y especial, este logro es de los dos, te amo mami.

A mi papá **Félix** por el apoyo que me has brindado y por estar aun con nosotros.

A mis hermanos, **Feilys y Félix** por ser los mejores del mundo, porque a pesar de tantas caídas siempre hemos estado unidos y gracias a eso hemos podido superar tantos obstáculos.

A mi tío **Antonio Sánchez**, por ser un padre más para mí, gracias por tu apoyo tío.

A mi abuela **Guillermina**, por estar siempre con nosotros, por apoyarme y por quererme como me quieres, te adoro.

A mis primos **Dinora y Carlos**, por su confianza en mí, y por estar presente en todo momento.

A todos y cada uno de los miembros de mi familia, que me apoyaron incondicionalmente y que creyeron siempre en mi.

A ti **Marisabel**, por ser mi amiga, por tu confianza en mí, por regalarme tu amistad. Tuvimos trabajo duro pero valió la pena amiga luchar para llegar hasta aquí y ser ahora además de amigas, hermanas y colegas. Te quiero mucho amiga.

A toda la familia **Belluso Rodríguez**, especialmente a la señora **Clara** y al señor **Alfio** por permitirme ser parte de su familia, por apoyarme, por haber pasado por tantas cosas conmigo y por tratarme como una hija más. De verdad gracias por tanto cariño.

A ti **Carlos**, por todo, por ser único, por nuestra amistad, por tu confianza y por tu cariño, por estar siempre pendiente de mí. Gracias por estar siempre allí, animándome a seguir adelante y a trabajar cada día con más dedicación, este logro también es tuyo. Te quiero mucho.

Al profesor **Francisco Astudillo**, por ser además de mi profesor, mi amigo durante mi tiempo de estudio en el Núcleo de Sucre. Gracias por tantas cosas que me ha enseñado.

A la profesora **Milena Amundarain**, por su ayuda y dedicación. Estoy enormemente agradecida, por sus orientaciones, su enseñanza y su esfuerzo realizado para ejecutar este trabajo.

A los profesores **Alexis Cova** e **Yraima Salas**, por tantas cosas que aprendí de ustedes durante mi carrera, por sus orientaciones y por su dedicación en la revisión de este trabajo.

A la **Universidad de Oriente** por contribuir con mi formación académica.

A las ingenieras **Adriana Contreras** y **Ana Rivas** por haberme apoyado, por la ayuda y colaboración que me brindaron durante la realización de mi trabajo.

A **HIDROCARIBE**, a la Licenciada **Marcia García**, a mi tutora industrial **Ing. Cruzmila Brito** y a todo el personal que labora en la planta potabilizadora **Juan José Codallos**, por su colaboración y por darme la oportunidad de realizar este trabajo en sus instalaciones.

A todos ustedes y a todos aquellos que no mencioné pero que también me apoyaron y creyeron en mí, de verdad muchísimas gracias.

RESUMEN

El trabajo realizado tuvo como finalidad evaluar el sistema de tratamiento de agua de la planta potabilizadora Juan José Codallos, realizándose para ello, el análisis de la fuente de abastecimiento de agua cruda de la misma, donde se determinó que esta cumple con la normativa establecida por el decreto N°883 para aguas de tipo 1A, pudiendo ser este tipo de aguas tratadas sólo con proceso de desinfección. Se determinaron los gradiente de velocidad (velocidad de agitación del fluido) y tiempos de retención de las unidades de coagulación y floculación que forman parte del sistema de potabilización de la planta, obteniéndose que para el caudal promedio más frecuente de operación (470 l/s), los gradientes de velocidad calculados para dichas unidades corresponden a los valores de $53,34 \text{ s}^{-1}$ y $20,1 \text{ s}^{-1}$, con 94,66% y 20,1% de desviación respectivamente, siendo a su vez el tiempo de retención igual a 0,83 minutos para la unidad de coagulación y 20,44 minutos para las unidades de floculación, lo que indica que la unidad de coagulación presenta muchas deficiencias, impidiendo la desestabilización de las partículas sólidas suspendidas en el agua, mientras que en la unidad de floculación el movimiento del fluido es suficiente para promover la formación de flóculos. Además se realizaron pruebas de jarras para determinar la dosis de coagulante necesario para lograr el proceso de potabilización, cuyos resultados demuestran que debido a la calidad del agua, no se requieren dosis elevadas de coagulante. Se determinó la eficiencia de las unidades operativas del sistema de potabilización, y estadísticamente se demostró que para el desarenador, sedimentadores y filtros de la planta, esta oscila entre 40% y 50 %, indicando que el sistema de potabilización en general presenta deficiencias

CONTENIDO

RESOLUCIÓN	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS	VII
RESUMEN	X
CONTENIDO	XI
LISTA DE TABLAS	XV
LISTA DE FIGURAS	XVII
CAPÍTULO 1	19
INTRODUCCIÓN	19
1.1. Presentación de la Empresa	19
1.2. Planta potabilizadora Juan José Codallos	20
1.3. Planteamiento del problema	20
1.4. Objetivos	22
1.4.1. Objetivo general	22
1.4.2. Objetivos específicos	22
CAPÍTULO 2	23
MARCO TEÓRICO	23
2.1. Antecedentes	23
2.2. Generalidades del agua	25
2.3. Fuentes de abastecimiento de agua	25
2.3.1. Fuentes de aguas superficiales	26
2.3.2. Fuentes de aguas subterráneas	26
2.4. Calidad del agua	26
2.4.1. Acondicionamientos de las aguas destinadas al uso doméstico según la calidad de las mismas	27
2.5. CARACTERÍSTICAS físicoquímicas y biológicas que definen la calidad del agua	28
2.5.1. Características físicas	28

2.5.2. Características químicas	30
2.5.3. Características biológicas	32
2.6. Agua potable y tratamientos convencionales de potabilización	34
2.6.1. Principales procesos de potabilización	35
2.6.1.1. Desbaste	35
2.6.1.2. Remoción de arenas	36
2.6.1.3. Coagulación – floculación	37
2.6.1.4. Sedimentación	42
2.6.1.5. Filtración	46
2.7. Eficiencia	48
2.8. Análisis estadístico de datos	49
2.8.1. Control estadístico de calidad	50
2.8.2. Frecuencia estadística	51
CAPÍTULO 3	53
DESARROLLO DEL PROYECTO	53
3.1. Análisis de la fuente de abastecimiento de agua cruda	53
3.1.1. Verificación de las condiciones ambientales y de sanidad de la fuente de abastecimiento de agua	53
3.1.2. Descripción del sistema de aducción de agua	54
3.1.3. Caracterización fisicoquímica y bacteriológica del agua cruda	55
3.1.3.1. Toma de muestras	55
3.1.3.2. Caracterización fisicoquímica del agua cruda	55
3.1.3.3. Caracterización bacteriológica del agua cruda	58
3.1.4. Análisis estadístico de los resultados obtenidos	59
3.2. Determinación de los gradientes de velocidad y tiempos de retención de las unidades de mezcla rápida y mezcla lenta	63
3.2.1. Descripción de la unidad de mezcla rápida o de coagulación	64
3.2.2. Cálculo del gradiente de velocidad en la unidad de coagulación	64
3.2.2.1. Régimen de flujo	64

3.2.2.2. Cálculo de las pérdidas de carga en la unidad de coagulación	67
3.2.2.3. Potencia disipada en la unidad de coagulación y gradiente de velocidad	69
3.2.3. Tiempo de retención en la unidad de mezcla rápida	70
3.2.4. Descripción de la unidad de mezcla lenta o de floculación	70
3.2.5. Cálculo del gradiente de velocidad	70
3.2.5.1. Potencia disipada y gradiente de velocidad en las unidades de floculación	74
3.2.6. Tiempo de retención en las unidades de floculación	75
3.3. Determinación de la dosis de coagulante requerida considerando el gradiente de velocidad hidráulico real de la planta	75
3.3.1. Verificación de los gradientes de velocidad calculados	76
3.3.2. Pruebas de jarras realizadas para verificar los gradientes calculados	77
3.3.3. Dosis de coagulante requerida para cumplir con el proceso de potabilización	80
3.4. Determinación de la eficiencia de las diferentes unidades operativas del sistema de potabilización	81
3.4.1. Desarenador	82
3.4.2. Unidades de coagulación y floculación	85
3.4.3. Sedimentadores	86
3.4.4. Filtros	89
3.4.5. Análisis estadístico de los resultados obtenidos	92
3.5. Equipos, materiales, sustancias y herramientas	92
3.5.1 Equipos	92
3.5.2 Herramientas	93
3.5.3 Materiales	93
3.5.4 Sustancias	93

CAPÍTULO 4	95
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	95
4.1. Análisis de la fuente de abastecimiento de agua cruda	95
4.1.1. Verificación de las condiciones ambientales y de sanidad de la fuente	95
4.1.2. Descripción del sistema de captación de agua	96
4.1.3. Caracterización fisicoquímica y bacteriológica del agua cruda	96
4.1.4. Análisis estadístico de los resultados obtenidos	99
4.2. Determinación de los gradientes de velocidad y tiempos de retención de las unidades de mezcla rápida y mezcla lenta	107
4.3. Determinación de la dosis de coagulante requerida considerando el gradiente de velocidad hidráulico real de la planta.	110
4.3.1. Verificación del gradiente de velocidad	110
4.3.2. Dosis de coagulante requerida para cumplir con el proceso de potabilización	111
4.4. Determinación de la eficiencia de las diferentes unidades operativas del sistema de potabilización.	112
4.4.1. Desarenador	113
4.4.2. Sedimentadores	113
4.4.3. Filtros	116
CONCLUSIONES	118
RECOMENDACIONES	120
BIBLIOGRAFÍA	122

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Acondicionamientos de las aguas destinadas al uso doméstico	27
Tabla 2.2. Clasificación de los sedimentadores según el sentido del flujo	43
Tabla 2.3. Clasificación de los filtros rápidos	46
Tabla 3.1. Volumen de ácido sulfúrico gastado para determinar alcalinidad del agua.	58
Tabla 3.2. Turbidez del agua cruda	60
Tabla 3.3. Factores para límites de control en gráficos de medias	62
Tabla 3.4. Límites de control obtenidos para la turbidez del agua cruda	63
Tabla 3.5. Velocidad promedio del fluido en la unidad de coagulación	66
Tabla 3.6. Gradientes de velocidad y tiempos de retención de las unidades de coagulación y floculación a los caudales más comunes de operación de la planta	77
Tabla 3.7. Índice de floculación de Willcomb (Arrieta, 2000)	78
Tabla 3.8. Prueba de jarra realizada para verificar los gradientes de velocidad calculados	79
Tabla 3.9. Prueba de jarra realizada para determinar la dosis requerida de coagulante.	81
Tabla 3.10. Turbidez del agua a la entrada y salida del desarenador	83
Tabla 3.10. Turbidez del agua a la entrada y salida del desarenador (Continuación)	84
Tabla 3.11. Turbidez del agua de entrada y salida de los sedimentadores	87
Tabla 3.11. Turbidez del agua de entrada y salida de los sedimentadores (Continuación)	88
Tabla 3.12. Turbidez del agua de entrada y salida de los filtros	90
Tabla 3.12. Turbidez del agua de entrada y salida de los filtros (Continuación)	91
Tabla 4.1. Características del agua cruda	97

Tabla 4.2. Promedio y límites de control de las características físicoquímicas y bacteriológicas del agua cruda	99
Tabla 4.3. Porcentajes de desviación de los gradientes de velocidad y tiempos de retención de las unidades de coagulación y floculación	109
Tabla 4.4. Dosis de coagulante a diferentes unidades de turbidez, color y pH del agua	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1. Variación de la turbidez del agua cruda	100
Figura 4.2. Variación del pH del agua cruda	101
Figura 4.3. Variación del color del agua cruda	102
Figura 4.4. Variación de sólidos disueltos totales	103
Figura 4.5. Variación de la alcalinidad del agua cruda	104
Figura 4.6. Variación de la conductividad específica del agua cruda	105
Figura 4.7. Presencia de organismos coliformes fecales en el agua cruda	106
Figura 4.8. Presencia de organismos coliformes totales en el agua cruda	107
Figura 4.9. Eficiencia del desarenador con respecto a la remoción de turbidez	113
Figura 4.10. Eficiencia con respecto a la remoción de turbidez del sedimentador N° 1 de la planta Juan José Codallos	114
Figura 4.11. Eficiencia con respecto a la remoción de turbidez del sedimentador N° 2 de la planta Juan José Codallos	115
Figura 4.12. Eficiencia con respecto a la remoción de turbidez del sedimentador 3 de la planta Juan José Codallos	115
Figura 4.13. Eficiencia con respecto a la remoción de turbidez de las unidades de filtración de la planta Juan José Codallos	116

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Presentación de la Empresa

La Compañía Anónima Hidrológica del Caribe filial de Hidroven, inició sus actividades el 01 de noviembre de 1990, sustituyendo a partir de dicha fecha al Instituto Nacional de Obras Sanitarias (INOS). Es una empresa regional con personalidad jurídica propia y patrimonio público cuyo accionista es el estado venezolano. Es una institución de servicio que cumple un fin social dirigido a planificar, organizar, coordinar, ejecutar y controlar las estrategias del sector de agua potable y saneamiento en los estados Sucre, Anzoátegui y Nueva Esparta, siendo una de las que cubre mayor territorio a nivel nacional.

Esta institución se encuentra registrada en el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MPPA). Actualmente está orientada junto al modelo de estado revolucionario a ser una empresa reconocida por su eficiencia y autosustentabilidad, que contribuye a mejorar la calidad de vida de los habitantes del oriente del país, a través de una gestión compartida con las comunidades y un personal comprometido, capacitado y en armonía con el medio ambiente.

La misión de Hidrocaribe está dirigida a la planificación, ejecución y control de las estrategias del sector de agua en su zona de influencia a fin de lograr una eficiente administración, operación, mantenimiento y ampliación de los servicios de agua potable y así mismo la recolección, tratamiento y disposición de las aguas residuales. Su visión es ser la empresa socialista comprometida con la calidad de vida de los habitantes del oriente del país, que gestiona eficientemente los servicios de agua potable y saneamiento, apoyados en el poder popular y en un personal capacitado e identificado con la misma, cuenta con cooperativas encargadas de la operación y mantenimiento de los sistemas de potabilización.

1.2. Planta potabilizadora Juan José Codallos

La planta de potabilización Juan José Codallos, fue inaugurada en marzo del año 1973. Está ubicado en el estado Sucre, en la vía San Juan de Macarapana, sector Guatacaral, en la ciudad de Cumaná del municipio Sucre. Fue diseñada para una producción de 1000 l/s, con la finalidad de garantizar la potabilidad de las aguas destinadas al consumo humano.

Es una planta tipo convencional cuya fuente de abastecimiento es el río Cancamure. Actualmente opera a un caudal aproximado de 500 l/s y abastece las ciudades de Cumaná, Araya y Marigüitar. El Sistema de tratamiento de esta planta está conformado por un dique toma que permite captar el agua directamente del río, un desarenador ubicado a 650 metros de la unidad anterior, en esta etapa del proceso, el agua esclorada, a fin de garantizar la desinfección del agua a ser consumida por la población, la cual posee tomas directamente de la aducción, cuya longitud es de 15 km y su diámetro de 42", y permite el transporte el agua hasta la planta donde se encuentran las unidades de mezcla rápida, mezcla lenta, sedimentadores y filtros.

1.3. Planteamiento del problema

La planta potabilizadora Juan José Codallos tiene aproximadamente 40 años de construida y en funcionamiento, por lo que a la fecha, presenta problemas operacionales debido al deterioro de algunas unidades. Tal es el caso, de los equipos de agitación mecánica en las unidades de mezcla rápida y mezcla lenta, los cuales, debido a problemas de corrosión, actualmente se encuentran fuera de servicio, por lo que se dificulta el proceso de coagulación – floculación.

Como es de conocimiento, en las unidades de floculación ocurre un proceso de aglutinamiento de partículas para formar pequeñas masas con peso específico superior al del agua llamadas flóculos, esto con el fin de remover turbiedad orgánica e inorgánica que no puede sedimentar rápidamente, eliminar bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación, destruir algas y/o plancton, así como también eliminar sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos (Arboleda,

2000). Esta masa de agua, posteriormente pasa por un proceso de sedimentación en el que las partículas aglutinadas se separan aprovechando la fuerza de gravedad.

En vista del problema que presenta la planta, el proceso de sedimentación no alcanza los niveles deseados en cuanto a remoción de turbiedad requerido para luego ser tratada mediante el proceso de filtración. No obstante, conduce a una dosificación inadecuada de químicos para remover la turbiedad y otros parámetros como color, organismos coliformes totales y fecales entre otros.

Para cumplir con el proceso de potabilización y con la normativa sanitaria de calidad de agua potable establecida, según Gaceta Oficial N° 36.395 de la República Bolivariana de Venezuela, la empresa se planteó realizar una evaluación de las unidades que conforman el sistema de potabilización de esta planta, considerando para ello las condiciones de la fuente de abastecimiento de la misma y sus alrededores, análisis de propiedades fisicoquímicas y bacteriológicas del agua cruda, agua clarificada y filtrada. Se determinaron los gradientes de velocidad hidráulicos con los que se considera que operan las unidades de mezcla rápida y mezcla lenta actualmente, así como también los tiempos de retención en las unidades mencionadas.

En función a lo antes descrito, se realizaron pruebas de jarra, en las cuales se simularon las condiciones de operación de la planta, a fin de obtener la dosis de coagulante requerida según la calidad del agua y la variación de caudal. Además se determinó la eficiencia en cada etapa del proceso de potabilización considerando para ello el porcentaje de remoción de turbiedad. La evaluación del sistema de potabilización de la planta Juan José Codallos, permitió conocer las deficiencias operacionales que presenta, y de sus resultados se obtuvieron opciones de solución para el mejoramiento de la calidad del agua y del proceso en general.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar el sistema de tratamiento de agua de la planta potabilizadora Juan José Codallos ubicada en la ciudad de Cumaná estado Sucre.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Analizar la fuente de abastecimiento de agua cruda.
2. Determinar los gradientes de velocidad y tiempos de retención en las unidades de mezcla rápida y mezcla lenta.
3. Determinar la dosis de coagulante requerida considerando el gradiente de velocidad real de la planta.
4. Determinar la eficiencia de las diferentes unidades operativas del sistema de potabilización.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Sánchez (2009), realizó la evaluación del reuso del agua de las descargas de lodos provenientes de los clarificadores de la planta potabilizadora de Santa Clara (Clarines). Explicó el funcionamiento de los clarificadores asociados a las descargas de lodos de la planta y calculó el caudal de agua perdida en dichas descargas. Esta evaluación permitió seleccionar una alternativa para recuperar el caudal de agua perdido en la planta, que para la época de invierno, según concluye el autor era de 43,49 l/s, además se demostró que los lodos pueden usarse como ayudante al proceso de floculación y que el agua proveniente de las descargas cumplían con la normativa ambiental para agua de tipo 1B; dando lugar a que pudieran ser enviadas directamente a los filtros de la planta.

Carpio y Ramírez (2008), realizaron la evaluación del tratamiento químico para el aumento de la capacidad en la planta potabilizadora Santa Clara; determinaron la calidad del agua cruda a fin de ajustar el punto de dosificación de sustancias químicas y obtener una relación adecuada de coagulantes para disminuir los costos del proceso. Concluyeron que la reubicación del punto de dosificación generó una mayor cantidad de lodos obtenidos y por ende un agua más clara y de mejor calidad.

Hernández (2007), evaluó el sistema de tratamiento de agua potable y de aguas para calderas a ser utilizadas en una planta pasteurizadora, este trabajo consistió en la identificación de los parámetros de diseño de las unidades del sistema de tratamiento de agua potable y agua para calderas, así como la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua de ambos sistemas, comparándose los resultados obtenidos con valores de diseño establecidos. Concluyó que la planta dispone de los equipos adecuados para la obtención de agua potable con calidad fisicoquímica y microbiológica permitida para el consumo humano y para uso de la empresa.

Castillo (2004), hizo una evaluación de la planta de tratamiento de agua potable del municipio Valle San Juan (Tolima) en Colombia. La metodología utilizada para llevar a cabo este trabajo se basó en el análisis del comportamiento de cada una de las unidades existentes en el sistema de potabilización de la planta determinando en cada una de ellas su eficiencia, al mismo tiempo determinó el abastecimiento de la planta considerando las pérdidas de caudal presentadas.

Según lo descrito en el párrafo anterior, esto permitió seleccionar una alternativa de tratamiento partiendo de las características del agua cruda y de los resultados obtenidos en cuanto a eficiencia de los equipos se refiere. Concluyó que el agua tratada no cumplía con los valores de calidad para agua de consumo humano según la normativa microbiológica establecida y que además la planta estudiada requiere de una adecuación en el diseño de los filtros ya que no cumplían con los objetivos de tratamiento de agua.

Pino(2003), evaluó la dosificación de coagulantes y su influencia en las operaciones de coagulación y filtración en las plantas de potabilización, obteniendo que la calidad física y química de los coagulantes, sulfato de aluminio, sinertron y hessidrex, se encontraba dentro de las normas establecidas y además se lograba la calidad del agua requerida.

Gómez (2002), realizó la evaluación del sistema de tratamiento de agua potable del campamento Macagua- Central Hidroeléctrica “23 de enero”, para ello se basó en la obtención y análisis de parámetros como caudales, características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua cruda y tratada, a fin de determinar la eficiencia del sistema de potabilización y establecer mejoras para aumentar la calidad del agua potable. Concluyó que las plantas Colina Sur y Caroní no operaban de acuerdo a sus capacidades de diseño y aun cuando las fluctuaciones en los caudales de entrada a las plantas no afectaban en sumo grado el funcionamiento de las unidades, si alteraban las concentraciones de sustancias químicas añadidas durante el tratamiento nocturno.

La semejanza de los antecedentes antes mencionados con el trabajo a realizar, está en la evaluación del sistema de potabilización de una planta, considerando la caracterización

de aguas crudas y tratadas, mediciones de caudal y determinación de eficiencia de las unidades tomando en cuenta las condiciones de operación actual de la planta, a fin de poder determinar cuan eficiente es el sistema.

No obstante, difiere de los mismos en la consideración de análisis de la fuente de captación de agua cruda y las condiciones de sus alrededores, y en la determinación de gradientes de velocidad en algunas unidades, a fin de poder obtener la dosis de coagulante requerido para el tratamiento del agua y mejorar la dosificación de sustancias químicas durante el proceso de potabilización.

2.2. Generalidades del agua

El agua es uno de los recursos naturales más familiares al hombre, por su utilidad, abundancia y amplia distribución sobre la tierra, constituye las $\frac{3}{4}$ partes de la corteza terrestre y forma el 67% del organismo humano. Es el solvente universal por excelencia y en su recorrido por la corteza terrestre disuelve una gran variedad de sustancias sólidas y gaseosas. En estas condiciones adquiere la propiedad de conducir la corriente eléctrica. El agua llamada químicamente “pura”, se caracteriza por ser un líquido incoloro, inodoro e insípido, el cual en condiciones denominadas normales (presión atmosférica al nivel del mar o sea 760mm de mercurio) se congela a 0°C y hierve a 100°C(Arrieta, 2000).

El producto de un sistema de abastecimiento de agua para consumo humano es el agua potable, la cual se define como aquella requerida para satisfacer las necesidades metabólicas, higiénicas y domésticas. Es considerada adecuada para consumo humano cuando la concentración de sus constituyentes no representa riesgos para la salud de los consumidores al largo de sus vidas (Najul, Blanco y Alberdi, 2005).

2.3. Fuentes de abastecimiento de agua

El agua circula continuamente a través del interminable ciclo hidrológico de precipitación o lluvia, escurrimiento, infiltración, retención o almacenamiento, evaporación y así sucesivamente. Se entiende por fuente de abastecimiento de agua aquel punto del ciclo natural del cual se desvía el agua temporalmente, para ser usada, regresando finalmente a la

naturaleza. Las fuentes de abastecimiento pueden clasificarse en superficiales y subterráneas (Departamento de sanidad del estado de Nueva York, 1991).

2.3.1. Fuentes de aguas superficiales

Entre estas fuentes se encuentran ríos, quebradas, lagos, y embalses, que tienden a ser de calidad variable, susceptible 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 distinta índole producto de las actividades humanas (Najul, Blanco y Alberdi 2005). Generalmente éstas son las más utilizadas para el tratamiento con fines de consumo humano.

2.3.2. Fuentes de aguas subterráneas

Por su parte estas fuentes de aguas tienden a mantener características uniformes, en general contienen cantidades apreciables de sólidos disueltos y pocos sólidos suspendidos, que se traducen en baja turbiedad y color aparente. Generalmente las comunidades más pequeñas emplean abastecimiento subterráneos de agua, por limitaciones del volumen acuífero, sin embargo, este tipo de abastecimientos tienden a proporcionar aguas excesivamente duras (Najul, Blanco y Alberdi 2005).

2.4. Calidad del agua

El término calidad del agua es relativo y solo tiene importancia universal si está relacionado con el uso del recurso. Esto quiere decir que una fuente de agua suficientemente limpia que permita la vida de los peces puede no ser apta para la natación y un agua útil para el consumo humano puede resultar inadecuada para la industria. Para decidir si un agua califica para un propósito particular, su calidad debe especificarse en función del uso que se le va a dar. Bajo estas consideraciones, se dice que un agua está contaminada cuando sufre cambios que afectan su uso real o potencial.

Es importante acotar que la evaluación de la calidad del agua se realiza usando técnicas analíticas adecuadas para cada caso. Para que los resultados de estas

determinaciones sean representativos, es necesario dar mucha importancia a los procesos de muestreo y a las unidades y terminología empleadas. Para una correcta interpretación de los datos obtenidos, los resultados de los análisis deben manejarse estadísticamente, teniendo en cuenta la correlación de iones, los factores que gobiernan el comportamiento de los componentes del agua, etcétera. El uso de gráficos ayuda a mostrar las relaciones físicas y químicas entre el agua, las fuentes probables de contaminación o polución y el régimen de calidad y, por tanto, a realizar adecuadamente la evaluación de los recursos hídricos (Vargas, 2004).

2.4.1. Acondicionamientos de las aguas destinadas al uso doméstico según la calidad de las mismas

De acuerdo con las normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos (decreto N° 883), las aguas destinadas al uso doméstico y al uso industrial que requiera de agua potable, siempre que ésta forme parte de un producto o sub producto destinado al consumo humano o que entre en contacto con él, son aguas de tipo 1, las cuales a su vez se clasifican como se muestra a continuación en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Acondicionamientos de las aguas destinadas al uso doméstico

Aguas tipo 1	
Sub tipo 1A	Aguas que desde el punto de vista sanitario pueden ser acondicionadas con la sola adición de desinfectantes.
Sub tipo 1B	Aguas que pueden ser acondicionadas por medio de tratamientos convencionales de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y cloración.
Sub tipo 1C	Aguas que pueden ser acondicionadas por proceso de potabilización no convencional.

La determinación del tipo de agua está basada en la realización de una serie de análisis fisicoquímicos y bacteriológicos del agua a tratar, para los cuales debe considerarse un número de muestras significativas, y cuyos resultados arrojados deben permanecer dentro de los rangos permisibles por la norma mencionada para cada tipo de agua.

2.5. CARACTERÍSTICAS fisicoquímicas y biológicas que definen la calidad del agua

2.5.1. Características físicas

Las características físicas del agua, llamadas así porque pueden impresionar a los sentidos (vista, olfato, etcétera), tienen directa incidencia sobre las condiciones estéticas y de aceptabilidad del agua. Entre las más importantes se consideran:

1. Turbiedad: La turbiedad, no es más que la capacidad de un líquido de diseminar un haz luminoso, puede deberse a partículas de arcilla provenientes de la erosión del suelo, a algas o a crecimientos bacterianos. El término arcilla comprende una gran variedad de compuestos, pero en general se refiere a la tierra fina (0.002 mm de diámetro de grano o menos), a veces coloreada, que adquiere plasticidad al mezclarse con limitadas cantidades de agua. Químicamente son silicatos de aluminio con fórmulas bastante complejas. La turbiedad es considerada como la interacción de un conjunto de ondas actuando sobre un conjunto de átomos y partículas, sin relación con la concentración de la suspensión (Arboleda, 2000).

En la práctica, la remoción de la turbiedad no es un proceso difícil de llevar a cabo en una planta de clarificación de agua; sin embargo, es uno de los que más influye en los costos de producción, porque, por lo general, requiere usar coagulantes, acondicionadores de pH, ayudantes de coagulación, entre otros. El diseño de los sistemas de remoción de turbiedad debe considerar no solo el tipo de partículas existentes sino también su tamaño y comportamiento.

Aunque no se conocen los efectos directos de la turbiedad sobre la salud, esta afecta la calidad estética del agua, lo que muchas veces ocasiona el rechazo de los consumidores. Por otra parte, estudios elaborados por Tracy y por Sanderson y Kelly han demostrado que en el proceso de eliminación de los organismos patógenos, por la acción de agentes químicos como el cloro, las partículas causantes de la turbiedad reducen la eficiencia del proceso y protegen físicamente a los microorganismos del contacto directo con el desinfectante. Por esta razón, si bien las normas de calidad establecen un criterio para

turbiedad en la fuente de abastecimiento, esta debe mantenerse mínima para garantizar la eficacia del proceso de desinfección (Barrenechea, 2004).

2. Color: Según Christman y Ghassemi (1961) la aparición de color en el agua puede deberse a la extracción producida por el agua de sustancias provenientes de maderas, la solución de productos de descomposición de las maderas, la solución de materia orgánica del suelo, una combinación de estos procesos. Cualquiera que sea su origen, el conjunto de compuestos responsables de color, recibe el nombre de sustancias húmicas. Si bien la estructura molecular de dichas sustancias no es bien conocida, se sabe que básicamente contienen carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno en porcentajes variables, y que muestran propiedades ácidas con pesos moleculares que van desde 200 hasta más de 50.000. Se clasifican en cuatro fracciones: ácido fúlvico, ácido húmico, ácido himatomelánico, y carbón húmico (Arboleda, 2000).

Existen muchos métodos de remoción del color. Los principales son la coagulación por compuestos químicos como el alumbre y el sulfato férrico a pH bajos y las unidades de contacto o filtración ascendente. Debido a que el color del agua se origina, en muchos casos, por la presencia de compuestos de naturaleza orgánica, se recomienda que la desinfección se realice luego de que este haya sido removido, para evitar que la aplicación de cloro como desinfectante pueda dar origen a la formación de trihalometanos, compuestos que tienen efecto cancerígeno en animales (Barrenechea, 2004).

3. Sólidos solubles e insolubles: Según el tipo de asociación con el agua, los sólidos pueden encontrarse:

- **Suspendidos**

Corresponden a los sólidos presentes en un agua residual, exceptuados los solubles y los sólidos en fino estado coloidal. Se considera que los sólidos en suspensión son los que tienen partículas superiores a un micrómetro y que son retenidos mediante una filtración en el análisis de laboratorio. Este tipo de sólidos precipita rápidamente cuando el agua se somete a reposo (Barrenechea, 2004).

- **Disueltos**

Mejor conocidos como sólidos filtrables, son los que se obtienen después de la evaporación de una muestra previamente filtrada. Comprenden sólidos en solución verdadera y sólidos en estado coloidal, no retenidos en la filtración, ambos con partículas inferiores a un micrómetro (1μ). Generalmente estos sólidos físicamente no influirán en la turbiedad, pero sí podrían definir su color u olor (Barrenechea, 2004).

4. Conductividad: es una expresión numérica de la capacidad de una solución acuosa para transportar la corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la existencia en el agua de las sales solubles, presentes en forma de iones, de la concentración total de estas sales, de su movilidad, de su estado de valencia y de la temperatura a la cual se realiza la medición de esta característica (HIDROCAPITAL, 1993).

2.5.2. Características químicas

El agua, como solvente universal, puede contener cualquier elemento de la tabla periódica. Sin embargo, pocos son los elementos significativos para el tratamiento del agua cruda con fines de consumo o los que tienen efectos en la salud del consumidor. Entre las características químicas del agua más importantes se pueden mencionar:

1. pH: Es una expresión de la concentración de los iones hidrógeno y representa una medida de la tendencia de la acidez o alcalinidad de una sustancia. (Departamento de sanidad del estado de Nueva York, 1991). El pH es la variable más importante que debe ser considerada en el tratamiento del agua. Se ha establecido que hay un rango de pH para cada tipo de agua, el cual produce buena coagulación y floculación en un corto tiempo con una dosis de coagulante dada. La extensión del rango del pH es afectada por el tipo de coagulante y por la composición química del agua, así como la concentración del coagulante.

Estudios realizados han demostrado que la zona del pH de menos solubilidad para los productos de hidrólisis del aluminio, está en el rango de 5.5 a 7.8. En la práctica en

presencia de iones y turbidez normalmente presentes en las aguas naturales el pH esta en el rango de 6.0 a 7.8. Las sales de hierro son similares con la diferencia de que la zona de pH se extiende más (Arrieta, 2000).

2. Alcalinidad: La alcalinidad representa una medida cuantitativa de los constituyentes alcalinos totales del agua, tanto en el estado de ionización como en el no ionizado. Dado que la alcalinidad de aguas superficiales está determinada generalmente por el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, ésta se toma como un indicador de dichas especies iónicas. No obstante, algunas sales de ácidos débiles como boratos, silicatos, nitratos y fosfatos pueden también contribuir a la alcalinidad en caso de estar presentes.

Estos iones negativos en solución están comúnmente asociados o pareados con iones positivos de calcio, magnesio, potasio, sodio y otros cationes. El bicarbonato constituye la forma química de mayor contribución a la alcalinidad. Dicha especie iónica y el hidróxido son particularmente importantes cuando hay gran actividad fotosintética de algas o cuando hay descargas industriales en un cuerpo de agua.

La alcalinidad, no sólo representa el principal sistema amortiguador del agua dulce, sino que también desempeña un rol principal en la productividad de cuerpos de agua naturales, sirviendo como una fuente de reserva para la fotosíntesis. Históricamente, la alcalinidad ha sido utilizada como un indicador de la productividad de lagos, donde niveles de alcalinidad altos indicarían una productividad alta y viceversa (Najul, Blanco y Alberdi, 2005).

3. Dureza: Es una característica del agua, debida principalmente a su contenido en carbonatos y sulfatos, y ocasionalmente a los nitratos y cloruros, de calcio, magnesio y hierro que ocasiona formación de grumos en el agua al contacto con el jabón. Además causa formación de incrustaciones en las calderas, intercambiadores de calor y otros equipos característicos de los procesos industriales reduciendo a su vez la eficiencia de los mismos. Esta característica produce además sabores indeseables en el agua. Generalmente

se determina a partir del contenido de calcio y magnesio en el agua y se expresa como carbonato de calcio equivalente (Departamento de sanidad del estado de Nueva York, 1991).

4. Hierro: El hierro puede estar presente en solución en estado coloidal, más o menos combinado con la materia orgánica, en forma de complejos orgánicos, complejos minerales o en forma de partículas en suspensión. La mayoría de las aguas naturales con pH comprendidos entre 5.5 y 8.6, condiciones en las que el hierro soluble presente en el agua está generalmente en estado ferroso. Bajo la acción del aire o por adición de cloro el hierro suele oxidarse 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, así como también alteran notablemente el sabor del agua (Arrieta, 2000).

5. Fluoruro: Elemento esencial para la nutrición del hombre. Su presencia en el agua de consumo a concentraciones adecuadas combate la formación de caries dental, principalmente en los niños (0,8 a 1,2 mg/L). Sin embargo, si la concentración de fluoruro en el agua es alta, podría generar manchas en los dientes (“fluorosis dental”) y dañar la estructura ósea. Las principales fuentes de concentraciones contaminantes de flúor en el agua son los efluentes de fábricas de acero y metales o de fábricas de plásticos y fertilizantes (Barrenechea, 2004).

2.5.3. Características biológicas

Las aguas superficiales están expuestas a una amplia gama de factores que pueden alterar su calidad biológica y ocasionar cambios simples o complejos y con diferentes niveles de intensidad. Esta alteración se puede originar en eventos naturales o en actividades antropogénicas, como el uso doméstico del agua y la consiguiente producción de aguas residuales, de la industria, minería y agricultura, entre otras.

La contaminación fecal de las fuentes de aguas superficiales para abastecimiento de consumo humano es uno de los problemas más preocupantes en los países en vías de desarrollo. En las grandes ciudades esta contaminación se debe principalmente al

vertimiento de los desagües sin ningún tratamiento. También se ha observado que la contaminación fecal es intensa en las zonas de arrastre provenientes de los corrales de engorde de bovinos y de las aviar.

Además del vertimiento o infiltración de aguas residuales sin tratar, también aportan contaminantes los lixiviados de rellenos sanitarios, los efluentes de aguas residuales con tratamiento deficiente, las infiltraciones de tanques sépticos, etcétera. Asimismo, la esorrentía pluvial y las inundaciones ocasionan el deterioro de la calidad del agua de los recursos hídricos. En las zonas rurales la contaminación fecal se origina por la defecación a campo abierto y por la presencia de animales domésticos y silvestres que actúan como reservorios de agentes patógenos.

El uso de aguas superficiales como fuentes de agua de bebida implica un riesgo de transmisión de enfermedades hídricas. Los agentes patógenos involucrados con la transmisión por esta vía son las bacterias, virus y protozoos, helmintos y cianobacterias, que pueden causar enfermedades con diferentes niveles de gravedad, desde una gastroenteritis simple hasta serios y a veces fatales cuadros de diarrea, disentería, hepatitis o fiebre tifoidea.

La transmisión hídrica es solo una de las vías, pues estos agentes patógenos también pueden transmitirse a través de alimentos, de persona a persona debido a malos hábitos higiénicos y de los animales al hombre, entre otras vías (Aurazo, 2004). Es difícil monitorear rutinariamente estos patógenos en el agua, para ello se requieren laboratorios especializados y en algunos casos manejar volúmenes de muestra de gran tamaño. Los organismos indicadores bacterianos más comunes en el agua son:

a. Coliformes totales: Se caracterizan por su capacidad de fermentar la lactosa a un rango de temperatura de 35-37 °C en 24-48 horas y producir ácido y gas. Tienen la enzima cromogénica B galactosidasa, que actúa sobre el nutriente indicador ONPG21. Este nutriente sirve como fuente de carbono y su efecto consiste en un cambio de color en el medio de cultivo. La reacción se detecta por medio de la técnica de sustrato definido. Las

técnicas de análisis más conocidas son la prueba de tubos múltiples y la de filtración con membrana. Los coliformes totales se reproducen en el ambiente, proporcionan información sobre el proceso de tratamiento y acerca de la calidad sanitaria del agua que ingresa al sistema y de la que circula en el sistema de distribución. No constituyen un indicador de contaminación fecal (Aurazo, 2004).

b. Coliformes termotolerantes (fecales): Se sabe que la contaminación fecal del agua está relacionada con la transmisión de agentes patógenos por el agua. Por este motivo, se requieren métodos sensibles que permitan medir el grado de contaminación fecal. Se denomina coliformes termotolerantes a ciertos miembros del grupo de bacterias coliformes totales que están estrechamente relacionados con la contaminación fecal. Por lo descrito en el párrafo anterior, antiguamente recibían la denominación de coliformes fecales; estos coliformes generalmente no se multiplican en los ambientes acuáticos. Los coliformes termotolerantes crecen a una temperatura de incubación de 44,5 °C. Esta temperatura inhibe el crecimiento de los coliformes no tolerantes (Aurazo, 2004).

2.6. Agua potable y tratamientos convencionales de potabilización

En general las fuentes de agua no satisfacen las exigencias de calidad de agua para consumo humano y es necesario someter las aguas a operaciones y procesos de tratamiento para remover sólidos en suspensión y coloides, materiales causantes de color y turbidez, destruir microorganismos potencialmente patógenos, hierro y manganeso disueltos, para satisfacer así las normas de calidad de agua.

Se define el agua potable como aquella que ha sido tratada con el objetivo de hacerla apta para el consumo humano, teniendo en cuenta todos sus usos domésticos. Algunas especies biológicas, físicas y químicas pueden afectar la aceptabilidad del agua para consumo humano. Es necesario, asimismo, considerar las transformaciones químicas y bioquímicas a que están expuestos los contaminantes del ambiente acuático. Las alteraciones químicas pueden afectar su disponibilidad biológica o tóxica (aumentarla o disminuirla). Poco se sabe acerca de estos procesos químicos, físicos y biológicos y sus

mecanismos, a pesar de que son indispensables para comprender los efectos en la salud del consumidor (Barrenechea, 2004).

Las diversas actividades agrícolas, ganaderas, industriales y recreacionales del ser humano han traído como consecuencia la contaminación de las aguas superficiales con sustancias químicas y microbiológicas, además del deterioro de sus características estéticas. Para hacer frente a este problema, es necesario someter al agua a una serie de operaciones o procesos unitarios, a fin de purificarla o potabilizarla para que pueda ser consumida por los seres humanos.

El conjunto de instalaciones donde se llevan a cabo una serie de procesos físicos y químicos, con el objeto de eliminar las impurezas presentes en el agua, a fin de hacerla apta para el consumo humano, se conoce como plantas de tratamiento, las cuales están diseñadas de acuerdo a las características del agua a tratar, cumpliendo con una serie de normas sanitarias que determinan el comportamiento de las mismas (Arrieta, 2000).

2.6.1. Principales procesos de potabilización

2.6.1.1. Desbaste

Su función principal es proteger las unidades del sistema de tratamiento y su objetivo es remover materiales de tamaño apreciable como hojas, trapos, ramas, peces u otros objetos, mediante la colocación de rejas o barras paralelas espaciadas en función del material a remover. Estas unidades generalmente se utilizan cuando la fuente de abastecimiento es un río debido al arrastre de materiales por las corrientes, así como en embalses, específicamente en las compuertas de las torre – tomas. Las rejas y tamices se clasifican en función a la separación entre barras o la apertura de la malla. Esta unidad representa una operación sencilla, pero el buen funcionamiento de la planta y su aspecto físico está condicionado por la correcta ejecución de las actividades de limpieza de la misma (Najul, Blanco y Alberdi ,2005).

2.6.1.2. Remoción de arenas

Esta operación se lleva a cabo mediante el uso de desarenadores, los cuales son unidades que permiten la separación de partículas discretas como las arenas cuya gravedad específica es superior a la del agua y que por su carácter abrasivo pueden deteriorar los equipos mecánicos del sistema, como bombas, agitadores, etc., interfiriendo en su correcta operación.

Estas unidades pueden ser de tipo detritus, clasificados a su vez en unidades de tipo convencional, de flujo vertical y de alta rata, y de tipo vórtice. Los primeros se caracterizan por ser de flujo horizontal. Las partículas se sedimentan al reducirse la velocidad con que son transportadas por el agua. Son generalmente de forma rectangular y alargada, dependiendo en gran parte de la disponibilidad de espacio y de las características geográficas. La parte esencial de estos es el volumen útil donde ocurre la sedimentación. En los desarenadores de flujo vertical el flujo se efectúa desde la parte inferior hacia arriba. Las partículas se sedimentan mientras el agua sube. Pueden ser de formas muy diferentes: circulares, cuadrados o rectangulares. Son muy utilizados en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Los desarenadores de alta rata consisten básicamente en un conjunto de tubos circulares, cuadrados o hexagonales o simplemente láminas planas paralelas, que se disponen con un ángulo de inclinación con el fin de que el agua ascienda con flujo laminar. Este tipo de desarenador permite cargas superficiales mayores que las generalmente usadas para desarenadores convencionales y por tanto éste es más funcional, ocupa menos espacio, es más económico y más eficiente. También se pueden encontrar los desarenadores tipo vórtice, los cuales se basan en la formación de un vórtice (remolino) inducido mecánicamente, que captura los sólidos en la tolva central de un tanque circular.

La velocidad de flujo en estas unidades debe ser constante y aproximadamente igual a 0.3 m/s, pues velocidades mayores resuspenderán el material decantado, y menores permitirán el asentamiento de las partículas diferentes a las arenas. Su tiempo de retención varía entre 20 y 60 segundos (Arrieta, 2000).

2.6.1.3. Coagulación – floculación

Se llama coagulación-floculación al proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con peso específico superior al del agua llamadas flóculos. Dicho proceso se usa para remoción de turbiedad orgánica e inorgánica que no puede sedimentar rápidamente, remoción de color, eliminación de organismos patógenos susceptibles a ser separados durante el proceso, destrucción de algas y plancton en general, eliminación de sustancias productoras de olor, sabor y precipitados químicos suspendidos.

Es necesario distinguir dos aspectos fundamentales en el proceso de coagulación-floculación:

La desestabilización de las partículas suspendidas, o sea la remoción de las fuerzas que las mantienen separadas.

El transporte de ellas dentro del líquido para que hagan contacto, generalmente estableciendo puentes entre sí y formando una malla tridimensional de coágulos porosos.

Al primer aspecto los autores suelen referirse como a coagulación y al segundo como la floculación; iniciándose la coagulación en el mismo instante de la dosificación de coagulantes al agua y dura sólo fracciones de segundos. Básicamente consiste en una serie de reacciones físicas y químicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma. No obstante, la floculación es el fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas chocan unas con otras para formar coágulos mayores. La coagulación tiene la finalidad de mejorar la eficiencia de remoción de partículas coloidales en el proceso de decantación (sedimentación de partículas floculentas).

En la coagulación pueden actuar tres mecanismos, el de adsorción– desestabilización, basado en las fuerzas electrostáticas de atracción y repulsión, el puente químico que establece una relación de dependencia entre las fuerzas químicas y la superficie de los coloides y el mecanismo de la sobresaturación de sustancias coagulantes en el agua. Sin embargo, en la floculación, debe distinguirse entre floculación ortocinética, la cual es

inducida por la energía comunicada al líquido debido a fuerzas externas (paletas giratorias, por ejemplo), y pericinética o con escala de turbulencia por encima o por debajo de la microescala de Kolmogoroff, inducida por el movimiento de agitación que poseen las partículas dentro del líquido (movimiento browniano)(Arboleda, 2000).

- **Unidades de coagulación**

El proceso de coagulación se debe llevar a cabo en una unidad de mezcla rápida, con el objeto de que intensidad de agitación pueda reunir la masa de agua en el momento en que se dosifica el coagulante, y así dar lugar a las reacciones de coagulación en las condiciones óptimas. Las unidades normalmente utilizadas para producir la mezcla rápida se pueden clasificar en dos grandes grupos, dependiendo del tipo de energía utilizada para producir la agitación: mecánica e hidráulica. En las plantas de tratamiento convencionales este proceso de mezclado rápido puede llevarse a cabo con mezcladores de flujo pistón o con retromezcladores.

En el primer caso, la adición de coagulantes se realiza al pasar la masa de agua por un punto determinado, en el cual se produce una fuerte turbulencia inducida por un aparato hidráulico (orificio, vertedero, constricción, entre otros). En el segundo caso, el agua es retenida en una cámara especial por un tiempo de detención nominal V/Q de 10 a 120 segundos, donde se aplica la sustancia coagulante, mientras se agita con una turbina, paleta rotatoria o cualquier otro sistema para crear turbulencia (Arboleda,2000).

- **Unidades de floculación**

Se acostumbra clasificar a los floculadores como mecánicos o hidráulicos de acuerdo con el tipo de energía utilizada para agitar la masa de agua. Los primeros, según el sentido del flujo, se pueden ser de flujo horizontal, de flujo vertical o de flujo helicoidal. Los segundos, así mismo, según el tipo de movimiento, se clasifican en reciprocantes y rotatorios.

Los floculadores hidráulicos 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. En este tipo de unidades la velocidad suele variar entre 0,1 y 0,6 m/s. Algunos diseñadores suelen hacer dos o tres sectores de floculación, incrementando el espaciamiento de los tabiques para producir una alta velocidad al principio (0,30 – 0,60 m/s) y baja al final (0,10 – 0,20 m/s).

Las velocidades altas pueden romper el flóculo, mientras que las bajas permiten la sedimentación de los lodos.

Los floculadores mecánicos utilizan energía de una fuente externa, normalmente un motor eléctrico acoplado a un intercambiador de velocidades, que hace posible la pronta variación de la intensidad de agitación. Los floculadores mecánicos más utilizados son, sin duda, son los de movimiento giratorio con paletas paralelas o perpendiculares al eje. El eje puede ser horizontal o vertical. Estos últimos normalmente son más ventajosos, porque evitan cadenas de transmisión, y también los pozos secos para la instalación de los motores. Su mantenimiento es difícil, pero cuando han sido bien proyectados, duran años sin dar mayores problemas.

- **Parámetros operacionales de las unidades de mezcla rápida y mezcla lenta**

Los parámetros operacionales de las unidades de mezcla rápida y mezcla lenta son la intensidad de agitación que se debe impartir a la masa de agua para dispersar al coagulante y lograr la aglutinación de las partículas desestabilizadas, la cual se evalúa mediante el gradiente de velocidad, y el tiempo durante el cual debe aplicarse esta agitación al agua también conocido como período de retención. En las unidades de mezcla rápida, la magnitud de estos parámetros dependerá del tipo de coagulación que se va a llevar a cabo: coagulación por adsorción, o coagulación por barrido. El gradiente de velocidad generado en estas unidades se determina a partir de la potencia disipada por unidad de volumen, de la siguiente forma:

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

(Ec.2.1)

Donde;

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

P= Potencia disipada en la unidad de mezcla (N/s)

μ = viscosidad (Kg/m x s)

Así mismo el tiempo de retención viene dado por la siguiente expresión:

$$t = \frac{V}{Q}$$

(Ec.2.2)

Siendo;

t : tiempo de retención (s)

V: volumen de la unidad de mezcla (m^3)

Q: Caudal (m^3/s)

En todo proceso de mezcla hay un consumo de energía para producir turbulencia, que puede ser: hidráulica o mecánica. En el caso de la planta Juan José Codallos, las unidades de mezcla rápida y mezcla lenta están diseñadas para que el proceso de agitación sea de forma mecánica, sin embargo actualmente su comportamiento es de tipo hidráulico, es por ello que se hará énfasis en este tipo de mezcladores.

Según Arboleda (2000), en los mezcladores hidráulicos, tanto para coagulación como floculación, el trabajo efectuado para distorsionar las líneas de flujo es el producido por la pérdida de energía denominada pérdida de carga. Por tanto la potencia disipada en estos mezcladores puede calcularse a partir de ella de la siguiente manera:

$$P = \frac{\gamma \times v \times H}{L}$$

(Ec.2.3)

Donde;

P: Potencia disipada (J/m^3)

v: Velocidad promedio del fluido (m/s)

H: Pérdida de carga (m)

Peso específico del agua (N/m^3)

L: longitud en la cual se produce pérdida de carga (m)

La velocidad promedio del fluido se puede determinar a partir de la siguiente ecuación:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (\text{Ec.2.4})$$

Siendo:

Q= Caudal (m^3/s)

A= Área del mezclador (m^2)

Debe recordarse que las pérdidas de carga en una tubería o canal, son las pérdidas de energía dinámica del fluido debido a la fricción de las partículas del fluido entre sí y contra las paredes de la tubería que las contiene. Las pérdidas pueden ser continuas, a lo largo de conductos regulares, o accidentales o localizadas, debido a circunstancias particulares, como un estrechamiento, un cambio de dirección, la presencia de una válvula, entre otros (Ven Te Chow, 2004).

En las unidades de mezcla rápida, la intensidad de agitación es importante sólo cuando el mecanismo predominante es el de adsorción o neutralización de carga. Cuando el mecanismo predominante es el de barrido, este parámetro es indiferente y debe limitarse a producir una distribución homogénea del coagulante en la masa de agua. En los casos en que el mecanismo predominante sea el de adsorción, los gradientes de velocidad (G) recomendados varían entre 700 y 1.000 s^{-1} y de 3.000a 5.000 s^{-1} para coagulantes inorgánicos, dependiendo del tipo de mezclador. Sin embargo, en las unidades de mezcla lenta, la intensidad de agitación puede variar entre 10 y 100 para flocladores hidráulicos y entre 35 y 100 para flocladores mecánicos (Vargas, 2004).

2.6.1.4. Sedimentación

Este proceso consiste en la separación parcial o en la concentración de las partículas sólidas suspendidas en un líquido, mediante asentamiento por gravedad. Este campo se puede dividir en las operaciones funcionales de espesamiento y clarificación. El objetivo principal del espesamiento es incrementar la concentración de los sólidos en suspensión en la corriente de alimentación, en tanto que el de la clarificación es eliminar una cantidad relativamente pequeña de partículas suspendidas y obtener un efluente claro. Las funciones mencionadas en el párrafo anterior son similares, ocurren en forma simultánea y la terminología solo permite hacer la distinción entre los resultados deseados del proceso primario (Perry, Green, 2001).

Las partículas en suspensión sedimentan en diferente forma, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración. Entre los tipos más comunes de sedimentación se pueden mencionar (Maldonado, 2004):

- **Sedimentación de partículas discretas (tipo 1):** Se llama partículas discretas a aquellas partículas que no cambian de características (forma, tamaño, densidad) durante la caída. Se denomina sedimentación o sedimentación simple al proceso de depósito de partículas discretas. Este tipo de partículas y esta forma de sedimentación se presentan en los desarenadores, en los sedimentadores y en los presedimentadores como paso previo a la coagulación en las plantas de filtración rápida y también en sedimentadores como paso previo a la filtración lenta.
- **Sedimentación de partículas floculentas (tipo 2):** Partículas floculentas son aquellas producidas por la aglomeración de partículas coloides desestabilizadas a consecuencia de la aplicación de agentes químicos. A diferencia de las partículas discretas, las características de este tipo de partículas (forma, tamaño, densidad) sí cambian durante la caída. Se denomina sedimentación floculenta o decantación al proceso de depósito de partículas floculentas. Este tipo de sedimentación se presenta en la clarificación de aguas, como proceso intermedio entre la coagulación-floculación y la filtración rápida.

- **Sedimentación por caída libre e interferida (tipo 3):** Cuando existe una baja concentración de partículas en el agua, éstas se depositan sin interferir. Se denomina a este fenómeno caída libre. En cambio, cuando hay altas concentraciones de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija y ocurre un depósito masivo en lugar de individual. A este proceso de sedimentación se le denomina depósito o caída interferida o sedimentación zonal. Cuando las partículas ya en contacto forman una masa compacta que inhibe una mayor consolidación, se produce una compresión o zona de compresión.

Este tipo de sedimentación se presenta en los concentradores de lodos de las unidades de decantación con manto de lodos (Maldonado, 2004). Los sedimentadores, se clasifican según el sentido del flujo y el tipo de clarificación que se genera como se muestra en la tabla 2.1 (Arboleda, 2000):

Tabla 2.2. Clasificación de los sedimentadores según el sentido del flujo

Sentido del flujo	Tipo de sedimentación	Ejemplo	Rata de flujo (m ³ /m ² /d)
Horizontal	1 y 2	Desarenadores	200-420 Y 15-30
Vertical	2 y 3	Manto de lodos	45-60
Inclinado (ascendente o descendente)	1 y 2	Sedimentadores con módulos o placas	120-180

- Factores que influyen en el proceso

Los siguientes factores influyen en el proceso de sedimentación o decantación (Maldonado, 2004).

a) Calidad de agua

Las variaciones de concentración de materias en suspensión modifican, en primer lugar, la forma de sedimentación de las partículas (con caída libre o interferida), así como las propiedades de las partículas modifican la forma de depósito (sedimentación para partículas discretas y decantación para partículas floculentas). Adicionalmente, variaciones de concentración de partículas o de temperatura producen variaciones de densidad del agua y originan corrientes cinéticas o térmicas que, a su vez, generan cortocircuitos hidráulicos en las unidades.

b) Condiciones hidráulicas

Los criterios y parámetros hidráulicos de diseño tienen gran influencia en la eficiencia de los sedimentadores o decantadores. A continuación se detallan los principales:

- En la zona de sedimentación: En esta zona se debe tener un número de Reynolds lo más bajo posible y el número de Froude más elevado para tender a un flujo laminar y estabilizar el flujo. En esta zona las líneas de flujo no deben encontrarse con ningún tipo de obstrucciones que alteren su trayectoria. Adicionalmente, la presencia de flujo de pistón mejora el proceso y el flujo mezclado no lo favorece.
- En la zona de entrada: La zona de entrada en un sedimentador es un conjunto de estructuras que debe permitir una distribución uniforme del flujo de agua hacia la zona de sedimentación. En una unidad de sedimentación convencional de flujo horizontal, esta distribución uniforme debe darse a todo lo ancho de la unidad y en profundidad. Las alteraciones del flujo en la zona de entrada deben evitarse y su presencia puede deberse a una velocidad excesiva del flujo en la entrada del sedimentador, o a que los

orificios de ingreso sean muy grandes y el movimiento de las paletas del floculador sea tal que comunica demasiada energía al flujo.

Al no haber disipación de esta energía en el tabique divisorio (caso de unidades convencionales de flujo horizontal), las masas de agua entran con diferente gradiente de velocidad, creando turbulencias que pueden extenderse dentro de la zona de sedimentación. Similarmente, puede mencionarse como causa de corrientes cinéticas la distribución desigual del flujo en la entrada del sedimentador (orificios de distintos diámetros o algunos parcialmente obstruidos), la existencia de tabiques que dejan pasar el agua solamente por el fondo, vertederos, etcétera, lo que produce corrientes como que adicionalmente modifican el tiempo de retención.

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

c) Factores externos

Paradójicamente, los factores externos al proceso de sedimentación, acondicionamiento previo (procesos previos a la sedimentación), prácticas operacionales y factores ambientales, son los que tienen más influencia en la eficiencia de un sedimentador o decantador. Buena o inadecuada coagulación y floculación ocasionan, respectivamente, altas o bajas eficiencias en los decantadores. Idéntico comentario cabe realizar acerca de la operación y el estado de la unidad, así como sobre los programas de mantenimiento existentes.

A la vez, el viento, al soplar sobre la superficie de los sedimentadores, puede producir corrientes de suficiente intensidad como para inducir cambios en la dirección del flujo y alterar el precario equilibrio de las masas de agua. En unidades grandes el viento

puede crear oleajes de cierta magnitud, lo que interfiere el proceso o desequilibra la distribución del flujo en las canaletas de salida.

2.6.1.5. Filtración

La filtración es la separación de una mezcla de sólidos y fluidos que incluye el paso de la mayor parte del fluido a través de un medio poroso, que retiene la mayor parte de las partículas sólidas contenidas en la mezcla (Perry, Green, 2001). Los filtros utilizados en sistemas de potabilización generalmente son filtros profundos, los cuales se pueden clasificar según la velocidad de filtración en lentos y rápidos, según el sentido del flujo en ascendentes y descendentes, según la carga por gravedad y por presión y según el material filtrante en filtros de arena, mixtos (arena – antracita o arena – antracita - granate)(Najul, Blanco y Alberdi ,2005).

Los sistemas de filtración pueden ser clasificados teniendo en cuenta los siguientes parámetros: el lecho filtrante, el sentido del flujo durante la filtración, la forma de aplicar la carga de agua sobre el medio filtrante y la forma de control operacional. En la tabla 2.3 se resume las diferentes alternativas para cada uno de los parámetros que usualmente se utilizan para clasificar los filtros rápidos (Maldonado, 2004).

Tabla 2.3. Clasificación de los filtros rápidos

Parámetro de clasificación			
Lecho filtrante	Sentido del flujo	Carga sobre el lecho	Control operacional
Simple (arena o antracita)	Descendente	A gravedad	Tasa constante y nivel variable
Lechos dobles o múltiples	Ascendente	A presión	Tasa constante y nivel constante
	Ascendente - descendente		Tasa declinante

- **Filtración por gravedad**

La filtración rápida, realizada por gravedad, usualmente se emplea en las plantas de tratamiento para fines de abastecimiento público. El factor económico es la variable que define su preferencia de uso. Estas unidades pueden ser de flujo ascendente (“filtro ruso”) y ser operadas con tasa de filtración constante o declinante. Cuando es de flujo descendente, la filtración rápida puede realizarse con tasa declinante o constante en filtros de lecho único de arena o de lechos múltiples (Maldonado, 2004).

- **Filtración a presión**

Siempre que las características operacionales y las del medio filtrante y de la suspensión sean semejantes, la filtración rápida bajo presión poco difiere de la realizada por gravedad. La filtración rápida bajo presión se realiza en tanques de lámina de acero y puede ser de flujo ascendente, descendente con medios filtrantes constituidos por una o más capas y ascendente-descendente (Maldonado, 2004).

- **Filtros de lecho simple**

En los medios de arena convencionales, la permeabilidad aumenta con la profundidad del filtro. En estas condiciones, los granos más pequeños quedan arriba y los más grandes abajo. Esto significa que a medida que el flóculo penetra dentro del lecho, encuentra poros más y más grandes por donde puede pasar con más facilidad. Es obvio que debido a esta estratificación inconveniente, el mayor porcentaje de partículas queda retenido en la superficie y, por lo tanto, la capacidad de almacenamiento de flóculos es limitada (Maldonado, 2004).

- **Filtros de lecho múltiple**

La solución lógica al problema de los filtros de lecho simple consiste en conseguir que la permeabilidad del lecho disminuya con la profundidad, de forma que los flóculos puedan penetrar y encontrar el medio más fino en las capas inferiores del filtro y el más grueso en las capas superiores. Como al emplear un solo tipo de material granular esto no es posible, pues el flujo de lavado lo estratifica en sentido contrario, se pensó en utilizar

medios de diferentes densidades, de manera que los granos gruesos fueran de un material poco denso, para que el flujo ascendente de lavado los estratifique y queden encima de los granos finos, cuya densidades mayor (Maldonado, 2004).

La eficiencia de la filtración está relacionada principalmente con la calidad del efluente. Por ejemplo, la filtración de agua cruda en filtros lentos de arena, y la de agua coagulada en filtros rápidos de arena resultan de interacciones distintas entre los granos del medio filtrante y las partículas suspendidas, pues un factor importante en la filtración lenta puede, muchas veces, no ser importante para la filtración rápida.

La calidad del efluente está relacionada con diversas características inherentes al filtro propiamente dicho, al uso a que se destina al agua filtrada y a la existencia de una operación eficiente. Los patrones de potabilidad varían entre los diversos países; por lo tanto, de un modo general, la turbiedad del efluente no debe superar las 5 UNT y, de preferencia, tampoco ser mayor de una UNT.

Se aconseja que el agua filtrada no presente color; por lo tanto, se toleran valores inferiores a 5 UC. Desde el punto de vista bacteriológico, los filtros constituyen una barrera sanitaria a los microorganismos, al tener una eficiencia de remoción superior a 99%. Es usual obtener agua filtrada que presente las condiciones antes mencionadas a través de filtros decapa única de arena y de dos o más capas. Sin embargo, la calidad del agua filtrada no es constante desde el inicio hasta el final de la carrera de filtración. Estudios realizados por Armitharajah y Wetstein mostraron que la degradación inicial del efluente es el resultado del lavado con agua en contracorriente (Maldonado, 2004).

2.7. Eficiencia

Una de las actividades que mayor interés despierta en los ingenieros operadores de plantas de tratamiento, es obtener la máxima eficiencia de todas las unidades. La eficiencia global del sistema de tratamiento de agua, se basa en lograr una determinada calidad deseada, a menor costo de operación posible. Si hablamos en términos de turbiedad, hay

que determinar específicamente que grado de remoción se debe exigir a cada unidad de tratamiento, para obtener un valor de turbiedad aceptable en la salida de la planta.

La eliminación de turbiedad y color en plantas de tratamiento convencionales, se limita a los procesos de sedimentación y filtración, considerando a los procesos de coagulación y floculación, como acondicionamiento previo del agua para la separación efectiva de partículas. Al evaluar la eficiencia de remoción de turbiedad de las unidades de sedimentación y filtrado de una planta de tratamiento de agua, considerando a su vez el funcionamiento los procesos anteriores de coagulación-floculación, se presentan situaciones diferentes en función de las características del agua bruta. Considerando esto, en términos absolutos, la eficiencia se define como (Ríos, 2005):

$$\text{Eficiencia} = 1 - \frac{T_s}{T_e} \quad (\text{Ec.2.5})$$

Donde;

T_e : turbiedad del agua a la entrada (NTU)

T_s : turbiedad del agua a la salida (NTU)

2.8. Análisis estadístico de datos

La estadística es una ciencia que estudia la recolección, análisis e interpretación de datos, ya sea para ayudar en la toma de decisiones o para explicar condiciones regulares o irregulares de algún fenómeno o estudio aplicado, de ocurrencia en forma aleatoria o condicional. Sin embargo estadística es más que eso, en otras palabras es el vehículo que permite llevar a cabo el proceso relacionado con la investigación científica.

La base de todo análisis estadístico consiste en el hecho que todos los resultados están afectados, en una u otra forma, por errores debido al azar. Estos errores, pueden producirse cuando se tratan de estimar un resultado, en el desarrollo de un modelo confiable o al tratar de poner a prueba una hipótesis. Los métodos estadísticos se basan en un solo concepto, el de la variabilidad. Es a través de este concepto fundamental que se establece una base para el diseño de experimento y el análisis de los datos (Wikipedia, 2011).

2.8.1. Control estadístico de calidad

El control estadístico de calidad tiene como objetivo monitorizar de forma continua, mediante técnicas estadísticas, la estabilidad de algún proceso, y mediante los gráficos de control este análisis se efectúa de forma visual, representando la variabilidad de las mediciones para detectar la presencia de un exceso de variabilidad no esperable por puro azar, y probablemente atribuible a alguna causa específica que se podrá investigar y corregir.

Este método se basa en el mantenimiento de las desviaciones dentro de ciertos márgenes de tolerancia y se debe tomar en cuenta que las causas que dan origen a tales desviaciones deben corregirse o eliminarse a fin de obtener una producción uniforme dentro de los rangos establecidos. La aplicación de los cálculos estadísticos al control de calidad en la industria fueron desarrollados por Shewhart y Chevyshev, quienes definieron los límites de tolerancia de las variaciones debidas al azar en cualquier proceso donde se toma una muestra representativa de la producción para evaluar la actividad productiva de cada empresa.

En los gráficos de control, se representa a lo largo del tiempo el estado del proceso que se desea estudiar. En el eje horizontal (X) se indica el tiempo, mientras que el eje vertical (Y) se representa algún indicador de la variable cuya calidad se mide. Además se incluye otras dos líneas horizontales, conocidos como límites superior e inferior de control, escogidos éstos de tal forma que la probabilidad de que una observación esté fuera de esos límites sea muy baja si el proceso está en estado de control, habitualmente inferior a 0.01 (Molinero, 2003).

Un valor que se ubique entre los límites de control es equivalente a no poder rechazar la hipótesis estadística. Otro que se encuentre fuera de los límites equivale al rechazo de la hipótesis. En uno y otro caso cabe la posibilidad de error. Error de tipo I, rechazar cuando es cierta la hipótesis y el de tipo II no rechazar cuando es falsa.

2.8.2. Frecuencia estadística

Se llama frecuencia a la cantidad de veces que se repite un determinado valor de la variable. Se suelen representar con histogramas y con diagramas de Pareto. En estadística se pueden distinguir hasta cuatro tipos de frecuencias, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes:

- **Frecuencia absoluta** (n_i) de una variable estadística X_i , conocida como el número de veces que aparece en el estudio este valor. A mayor tamaño de la muestra, aumentará el tamaño de la frecuencia absoluta; es decir, la suma total de todas las frecuencias absolutas debe dar el total de la muestra estudiada (N).
- **Frecuencia relativa** (F_r), definida como el cociente entre la frecuencia absoluta y el tamaño de la muestra (N). Es decir,

$$F_r = \frac{n_i}{N} = \frac{n_i}{\sum n_i} \quad (\text{Ec.2.6})$$

Si multiplicamos la frecuencia relativa por 100 obtendremos el porcentaje que presentan esta característica respecto al total de N , es decir el 100% del conjunto.

- ▶ **Frecuencia absoluta acumulada** (N_i), definida como el número de veces n_i en la muestra N con un valor igual o menor al de la variable. La última frecuencia absoluta acumulada deberá ser igual a N .
- ▶ **Frecuencia relativa acumulada** (F_i), es el cociente entre la frecuencia absoluta acumulada y el número total de datos, N . Es decir,

$$F_i = \frac{N_i}{N} \quad (\text{Ec.2.7})$$

Con la frecuencia relativa acumulada por 100 se obtiene el porcentaje acumulado que al igual que F_r deberá de resultar al final el 100% de N.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL PROYECTO

En este capítulo se presentan las herramientas necesarias y estrategias utilizadas para cumplir con los objetivos planteados, para llevar a cabo la evaluación del sistema de tratamiento de agua de la planta potabilizadora Juan José Codallos.

3.1. Análisis de la fuente de abastecimiento de agua cruda

Para llevar a cabo el desarrollo de esta etapa se verificaron las condiciones ambientales y de sanidad de la fuente, realizando para ello una observación directa de la misma y entrevistas no estructuradas a los operadores de la planta y a algunos vecinos del sector estudiado. Además de esto, esta etapa comprende una breve descripción del sistema de captación de agua y la caracterización fisicoquímica y bacteriológica de la misma.

3.1.1. Verificación de las condiciones ambientales y de sanidad de la fuente de abastecimiento de agua

El río Cancamure, es uno de los más importantes del estado Sucre, y está caracterizado por su aspecto cristalino y la constancia de su caudal durante casi todo el año. Sin embargo, durante el estudio realizado, se observaron, varios factores que amenazan el buen estado de la fuente. En las adyacencias del río mencionado, específicamente en las cercanías del punto de captación de agua, se observó una gran cantidad de comunidades, cuyas viviendas en ciertos sectores, se encuentran ubicadas a orillas de este, y la mayoría de ellas no cuentan con servicios de aguas residuales, razón por la cual dichas aguas son vertidas directamente al río. Así mismo se observaron desechos sólidos como plásticos, botellas de vidrio, papeles, entre otros, en menor cuantía.

Además de lo antes descrito, según las personas entrevistadas, existen muchos criaderos de ganado vacuno, porcino y aviar en las cercanías de la fuente, cuyos desechos son vertidos a orillas de esta y arrastrados a su vez por la corriente de agua. Estas personas,

también afirman la existencia de talleres mecánicos en los sectores vecinos, cuyos desechos líquidos como gasolina y otras grasas utilizadas son lanzados al río.

3.1.2. Descripción del sistema de aducción de agua

Para llevar a cabo esta actividad se realizó una inspección en el lugar en que se encuentra ubicado el sistema de captación de agua cruda que alimenta a la planta Juan José Codallos, el cual está constituido por un dique toma dispuesto transversalmente al río, ubicado específicamente en el caserío Cancamure sector La Compuerta.

Cuando el caudal a tratar es relativamente bajo y la secciones transversales del río en el sitio donde se proyecta la bocatoma son de poco ancho (0 a 10 m), es conveniente proyectar un dique con el objeto de garantizar el caudal que se debe captar. En el diseño de un dique toma, se debe considerar el área de captación dada y en la zona de rejilla no se debe permitir el paso de material grueso; esto se logra dimensionando adecuadamente los espacios entre las barras de la rejilla de captación.

El dique se proyecta en forma tal que la rata de sedimentación en la zona del embalse no sea excesivamente alta, lo cual se logra obligando a que el agua fluya con moderada velocidad a través de la obra de captación. Las riberas del río o quebrada, en la zona donde se proyecta el dique, deben tener una buena estabilidad geológica y preferiblemente el suelo debe ser roca a fin de aminorar costos en los anclajes.

La obra de captación de agua está provista de compuertas deslizantes y una estructura de retención de sólidos. Este sistema funciona por aprovechamiento de la fuerza de gravedad. Aguas abajo de dicha obra, se encuentra una tanquilla que permite la descarga del agua, y a partir de la cual comienza el sistema de aducción de acero de 36 pulgadas de diámetro hasta la unidad desarenadora de la planta, ubicado a 604,35 metros de la tanquilla antes mencionada.

3.1.3. Caracterización fisicoquímica y bacteriológica del agua cruda

Para caracterizar el agua cruda y poder establecer el tipo de agua a tratar, en función a las normas para clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos (Gaceta oficial N° 883), se realizaron análisis de laboratorio a fin de determinar propiedades del agua como turbidez, color, pH, alcalinidad, sólidos disueltos totales, conductividad específica y presencia de organismos coliformes fecales y totales.

3.1.3.1. Toma de muestras

Para realizar los análisis fisicoquímicos, las muestras fueron tomadas en recipientes plásticos de un litro, directamente en el punto de captación de agua cruda (dique toma), durante 10 semanas. No obstante, para realizar los análisis de bacteriología las muestras fueron tomadas en el mismo sitio y durante el mismo período, pero sólo dos veces por semana, y fueron captadas en recipientes de vidrio borosilicato de tapa esmerilada, de 100 ml, previamente esterilizados, con el objeto de evitar contaminación de las muestras y alteración de la bacteriología de las mismas.

Los recipientes de captación de muestras utilizados para realizar análisis fisicoquímicos y bacteriológicos. Una vez tomadas las muestras, estas fueron llevadas al laboratorio de la planta Juan José Codallos, donde se realizaron los análisis cumpliendo con los métodos estandarizados para análisis de agua potable y aguas residuales (APHA-AWWA-WPCF, 1980).

3.1.3.2. Caracterización fisicoquímica del agua cruda

- ▶ **Turbidez:** Para determinar este parámetro se utilizó el método AWWA 2130, el cual consiste en lo siguiente:
 - a) Agregar la muestra en una celda de adsorción.
 - b) Encender el turbidímetro.
 - c) Introducir la celda que contiene la muestra en el equipo.
 - d) Esperar la estabilización de la lectura.
 - e) Tomar nota del valor reflejado por el equipo en unidades de NTU.

- ▶ **pH:** Esta característica se determinó mediante el método AWWA 4500 pH-value-B, el cual consiste en:
 - a) Agregar 50 ml del agua a analizar en un beaker.
 - b) Encender el medidor de pH.
 - c) Introducir el electrodo del equipo en el beaker que contiene la muestra.
 - d) Esperar la estabilización de la lectura.
 - e) Tomar nota del valor de pH obtenido.

- ▶ **Color:** El color de las muestras se determinó usando el método de comparación visual AWWA 2120-B, este método, consiste en comparar el color de la muestra con soluciones patrones de platino-cobalto preparadas a diferentes unidades de color. Para aplicar este método se procedió de la siguiente manera:
 - a) Agregar 100 ml de la muestra en un tubo Nessler.
 - b) Colocar dicho tubo en el orificio central del comparador de color.
 - c) Colocar en ambos lados del tubo que contiene la muestra las soluciones patrones de platino-cobalto de diferentes unidades de color.
 - d) Tomar nota de la lectura realizada en unidades de color (UC).

- ▶ **Conductividad:** Esta característica se determinó mediante el método AWWA 2510-A, el cual consiste en:
 - a) Colocar 50 ml de muestra en un beaker.
 - b) Encender el conductímetro.
 - c) Sumergir el electrodo del equipo en la muestra contenida en el beaker.
 - d) Tomar nota del valor de conductividad en μmhos .

- ▶ **Sólidos disueltos totales:** Los sólidos disueltos totales de las muestras analizadas fueron determinados de la misma manera que se determinó la conductividad, debido a que el equipo utilizado para medir dicha característica también determina la cantidad de sólidos disueltos totales al mismo tiempo que determina la conductividad, por lo que con el procedimiento antes descrito se tomó nota de los valores de sólidos disueltos reflejados por el equipo en unidades de ppm.

- **Alcalinidad:** Esta se determinó mediante el método AWWA 2320- B, cuyos pasos a seguir son:
- Colocar 50 ml de muestra en un matraz enlermeyer.
 - Añadir una gota de tiosulfato de sodio, para eliminar las posibles interferencias de sustancias que afectan el cambio de color.
 - Agregar tres gotas de indicador mixto.
 - Titular poco a poco con ácido sulfúrico 0,02 N agitando suavemente hasta obtener un color rosa pálido.
 - Tomar nota del volumen de titulante gastado

Una vez realizado cada uno de los pasos se utiliza la siguiente expresión para el cálculo de la alcalinidad:

$$A = \frac{N \times V_{H_2SO_4} \times P_{eq} \text{ CaCO}_3 \times 1000}{V_m} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

A: alcalinidad (mg/l = ppm).

N: normalidad del ácido sulfúrico = 0,02 N (0,02 eq-g/l).

V: volumen de ácido sulfúrico gastado (ml).

P_{eq} CaCO₃: peso equivalente del carbonato de calcio = 50 g/eq-g

V_m: volumen de la muestra (ml) = 50 ml

1000: factor de conversión de g a mg.

En la tabla 3.1, se muestran los volúmenes de titulante obtenidos en cada análisis realizado y cada uno de ellos fue sustituido en la ecuación 3. Considerando el primer valor de la tabla mencionada y sustituyéndolo en la expresión de alcalinidad se obtiene:

$$A = \frac{(0,02 \text{ eq-} \frac{\text{g}}{\text{l}}) \times (2,8 \text{ ml}) \times (50 \frac{\text{g}}{\text{eqg}}) \times (1000)}{50 \text{ ml}} = 56 \text{ mg/l}$$

Tabla 3.1 Volumen de ácido sulfúrico gastado para determinar alcalinidad del agua.

semanas	Volumen de H ₂ SO ₄ (ml)				
06/06/2011	2,82	3,0	3,29	3,5	2,9
13/06/2011	2,2	3,4	2,6	3,3	3,6
20/06/2011	2,9	2,2	2,5	3,3	3,3
27/06/2011	2,2	3,2	2,8	2,6	3,3
04/07/2011	2,2	3,0	3,3	2,5	2,7
11/07/2011	3,3	3,5	1,9	2,3	2,3
18/07/2011	2,8	3,7	2,5	3,3	2,8
25/07/2011	3,2	1,9	3,4	3,0	3,6
08/08/2011	3,7	2,2	3,1	2,0	1,9
15/08/2011	1,9	2,3	2,7	2,5	1,5

3.1.3.3. Caracterización bacteriológica del agua cruda

Para determinar la presencia de organismos coliformes fecales y totales en las muestras captadas, se utilizó el método de Colilert, y consiste en la realización de los siguientes pasos:

- 1) Agregar el contenido de un sobre de reactivo colilert en el recipiente que contiene la muestra tomada.
- 2) Agitar suavemente, a fin de diluir el reactivo.
- 3) Verter la solución en una bandeja para análisis bacteriológico de 97 celdas y sellarla.
- 4) Encubar por 24 horas a $35 \pm 0,5$ °C.

- 5) Realizar la lectura de los resultados obtenidos una vez transcurrido el tiempo antes mencionado. Dicha lectura consiste en contar el número de celdas de color amarillo que aparecen en la bandeja y de acuerdo al valor obtenido leer en la tabla C-1 en el anexo C, el número de organismos coliformes totales presentes en la muestra.
- 6) Para determinar la presencia de organismos coliformes fecales se introduce la bandeja en una lámpara fluorescente, realizando el conteo del número de celdas que fluorescen, en función al resultado obtenido, leer en la tabla C-1 el número de organismos coliformes fecales correspondientes al número de celdas fluorescentes contadas. Los resultados de los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos realizados al son presentados en el anexo D.

3.1.4. Análisis estadístico de los resultados obtenidos

Para el análisis de los resultados obtenidos en la caracterización del agua cruda, se utilizó el método estadístico límite de control, también conocido como control estadístico de calidad, el cual consiste en graficar el comportamiento de una variable en función del tiempo, tomando en cuenta los límites de tolerancia de la misma. Para obtener los gráficos correspondientes al comportamiento de cada variable se realizaron los cálculos mostrados a continuación.

⊗ **Media aritmética de las muestra**

Para el cálculo de la media aritmética se utilizó la siguiente expresión:

$$X = \frac{\sum \text{muestras}}{n} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde;

X: media aritmética.

n: tamaño de la muestra o numero de muestras.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en la determinación de la turbidez, mostrados en la tabla 3.2 y sustituyendo los valores en la ecuación 3.2 se obtiene que la media aritmética de los valores obtenidos durante la semana N° 1 será:

Tabla 3.2. Turbidez del agua cruda

SEMANAS	TURBIDEZ (NTU)				
06/06/2011	1,2	6,0	8,0	7,5	12,0
13/06/2011	10,0	1,3	20,0	8,0	10,0
20/06/2011	4,5	15	2,9	2,2	9,0
27/06/2011	18,0	2,5	3,5	14,0	9,5
04/07/2011	8,0	2,1	2,2	2,9	4,5
11/07/2011	5,0	2,6	2,4	2,5	5,0
18/07/2011	6,8	10,6	7,5	58,0	39,0
25/07/2011	10,2	18,9	15,4	6,9	12,0
08/08/2011	8,8	5,8	10,4	4,6	12,0
15/08/2011	10,6	7,4	4,6	10,7	5,4

$$X = \frac{(1,2+6+8+7,5+12)NTU}{5} = 6,94 \text{ NTU}$$

Este cálculo se realizó para cada una de las semanas en las que fueron tomadas las muestras. Una vez obtenido cada una de las medias aritméticas correspondientes a las semanas de análisis, se determinó la media aritmética de estas medias denotada con la letra M, utilizando de igual manera la ecuación 3.2:

$$M = \frac{(6,94+9,86+6,72+9,5+3,94+3,52+4,38+12,68+8,32+7,74) \text{ NTU}}{10} = 9,358 \text{ NTU}$$

⊗ **Rango de las muestras (R)**

Para cada semana se determinó un rango de las muestras, el cual consiste en restar al valor máximo de la variable el valor mínimo obtenido durante la semana, como se muestra en la siguiente expresión:

$$R = \text{valor máximo} - \text{valor mínimo} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Sustituyendo los valores máximo y mínimo correspondientes a la semana N° 1 de la tabla 3.2 en la ecuación 3.3 se obtiene:

$$R = 12 \text{ NTU} - 1,2 \text{ NTU} = 10,8 \text{ NTU}$$

Después de haber calculado los rangos para cada semana, utilizando la ecuación 3.2, se calculó la media aritmética de dichos rangos, la cual se denotó con la letra K:

$$K = \frac{(10,8+18,7+12,8+15,5+5,9+2,6+51,2+12+7,4+6,1) \text{ NTU}}{10} = 14,3 \text{ NTU}$$

⊗ **Límites de control**

Para determinar los valores correspondientes a los límites de superiores e inferiores de control, se utilizaron las siguientes expresiones:

$$LSC = M + A \times K \quad (\text{Ec. 3.4})$$

$$LIC = M - A \times K \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Donde;

LSC: límite de control superior

LIC: límite de control inferior

A: factor para límites de control

Sustituyendo los valores de M y K calculados y el valor de A correspondiente al número de muestras realizadas por semana, tomado de la tabla 3.3, mostrada a continuación, en las ecuaciones 3.4 y 3.5 se obtiene:

Tabla 3.3 Factores para límites de control en gráficos de medias

	Gráfico de medias
Tamaño de muestra n	Factor A ₂
2	1.88
3	1.02
4	0.73
5	0.58
6	0.48
7	0.42
8	0.37
9	0.34
10	0.31

$$\text{LSC} = (9,358 \text{ NTU}) + (0,31 \times 14,3 \text{ NTU}) = 17,652 \text{ NTU}$$

$$\text{LIC} = (9,358 \text{ NTU}) - (0,31 \times 14,3) = 1,064 \text{ NTU}$$

Los resultados obtenidos correspondientes a los límites de control superiores e inferiores calculados en cada semana son presentados en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Límites de control obtenidos para la turbidez del agua cruda

LIC	LSC	X (NTU)	M
1,064	17,652	6,94	9,358
1,064	17,652	9,86	9,358
1,064	17,652	6,72	9,358
1,064	17,652	9,5	9,358
1,064	17,652	3,94	9,358
1,064	17,652	2,6	9,358
1,064	17,652	51,2	9,358
1,064	17,652	12	9,358
1,064	17,652	7,4	9,358
1,064	17,652	6,1	9,358

Una vez realizado los cálculos anteriores se procedió a realizar los gráficos necesarios utilizando para ello como herramienta el programa Microsoft Excel. Estos cálculos fueron realizados para cada una de las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua determinadas. Los resultados de los cálculos realizados son mostrados en el anexo E y los gráficos correspondientes a cada característica son presentados en el capítulo 4.

3.2. Determinación de los gradientes de velocidad y tiempos de retención de las unidades de mezcla rápida y mezcla lenta

Para el cumplimiento de esta etapa, se realizaron mediciones de las dimensiones de las unidades de mezclado rápido (coagulación) y mezclado lento (floculación). Así mismo, se determinaron pérdidas de carga en cada una de las unidades mencionadas, tomando en

cuenta las condiciones de operación de las mismas y la variación de caudal de entrada a la planta. Generalmente el caudal de entrada de agua a la planta varía entre 400 l/s y 500 l/s, para efectos de cálculo se consideró 470 l/s, siendo este el caudal más frecuente de operación.

3.2.1. Descripción de la unidad de mezcla rápida o de coagulación

La unidad de coagulación de la planta Juan José Codallos, consiste en una tanquilla de forma rectangular elaborada en concreto de 9,77 m de longitud y 2,02 m de ancho. Posee dos baffles o tabiques del mismo material sin perforaciones de 1,40 m de ancho cada uno.

3.2.2. Cálculo del gradiente de velocidad en la unidad de coagulación

Para determinar el gradiente de velocidad primero se determinó el régimen de flujo en la tanquilla utilizando para ello la expresión del número de Reynolds, posteriormente se calcularon las pérdidas de carga que generan la potencia disipada en la unidad y el valor de dicha potencia. A continuación se presentan los cálculos previos a la determinación del gradiente de velocidad en la unidad de coagulación.

3.2.2.1. Régimen de flujo

El flujo de fluidos compresibles o incompresibles puede clasificarse atendiendo a la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas. Esta relación se representa mediante el número de Reynolds (N_{Re}). Así, valores bajos del número de Reynolds (<2500) indican que el flujo es laminar, mientras que valores altos (>2500) indican que el flujo es turbulento (Perry y Green, 2007). Para determinar el régimen de flujo en la unidad de coagulación se utilizó la expresión del número de Reynolds para canales abiertos (Ven Te Chow; 2004):

$$N_{Re} = \frac{\rho \times V \times L}{\mu} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Donde;

ρ : densidad del agua (Kg/m^3).

V : velocidad promedio del fluido en la unidad (m/s).

L : longitud recorrida por el fluido (m).

μ : viscosidad del fluido (Kg/m xs).

La temperatura del agua en la tanquilla de mezcla rápida generalmente varía entre 23°C y 24°C . Tomando en cuenta un valor de temperatura del fluido igual a 23°C , se tiene que la densidad del agua es $997,538 \text{ Kg/m}^3$ y la viscosidad a la misma temperatura es $0,000933 \text{ Kg/m x s}$ (Perry y Green , 2007). La longitud característica está determinada por el recorrido del fluido y la velocidad del fluido se define como la relación entre el caudal y el área transversal del mismo. Calculando la longitud característica y la velocidad del fluido se obtiene:

$$L=2,02 \text{ m}+6,86 \text{ m}+2,02 \text{ m}+6,22 \text{ m}=17,11 \text{ m}$$

El área ocupada por el fluido dentro de la unidad de coagulación se define como:

$$A=b \times Y \tag{Ec. 3.7}$$

Donde,

A: área

b: ancho

Y: altura de líquido en la unidad

Para un caudal de 470 l/s la altura de líquido en la unidad de coagulación de la planta Juan José Codallos es igual a $1,2 \text{ m}$. Considerando el cambio de dirección del fluido durante su recorrido por la tanquilla y sustituyendo la expresión 3.7 en la ecuación 2.4 se obtiene la velocidad del fluido de la siguiente manera:

$$v = \frac{Q}{b \times Y} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

El ancho estará determinado por cada una de las distancias mostradas en la figura 3.11, por lo que la velocidad del fluido entre cada punto se calculó sustituyendo cada uno de estos valores en la ecuación 3.8. Así, para la distancia AB = 3,55 m la velocidad es:

$$v_{AB} = \frac{\left(\frac{470\text{l}}{\text{s}}\right) \times \left(\frac{1\text{m}^3}{1000\text{l}}\right)}{3,55\text{m} \times 1,2\text{m}} = 0,1103 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Este cálculo se realizó para cada una de las distancias mostradas en la figura 3.11, y los resultados obtenidos, así como el valor promedio de la velocidad se muestran en la tabla 3.5 mostrada a continuación.

Tabla 3.5. Velocidad promedio del fluido en la unidad de coagulación

XY(m)	vxy(m/s)
3,55	0,1103
1,4	0,2797
0,62	0,6317
3,6	0,1087
3,3	0,1186
2,92	0,1341
v_{prom}=0,2093 m/s	

Sustituyendo los parámetros correspondientes en la ecuación 3.6 se obtiene que el número de Reynolds en la tanquilla de mezcla rápida de la planta Juan José Codallos es igual a:

$$N_{Re} = \frac{\left(\frac{997,538\text{Kg}}{\text{m}^3}\right) \times \left(0,2093 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \times (17,11 \text{ m})}{\left(\frac{0,000933\text{Kg}}{\text{m} \times \text{s}}\right)} = 3.828.838,45$$

3.2.2.2. Cálculo de las pérdidas de carga en la unidad de coagulación

El comportamiento de un mezclador rápido de tipo hidráulico es similar al comportamiento de un floculador hidráulico de tipo horizontal, donde las pérdidas de carga ocurren generalmente debido a la fricción por las paredes de las unidades y debido a las deformaciones del fluido ocasionadas por los tabiques o baffles que presentan las unidades (Arboleda, 2000).

- **Pérdidas de carga debido a la fricción**

Estas pérdidas se determinan utilizando la expresión de Manning (Arboleda, 2000):

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

Donde;

h_f : pérdida de carga debido a la fricción

v : velocidad promedio del fluido

L : longitud recorrida por el fluido

R_H : radio hidráulico

n : factor de rugosidad de Manning

$$R_H = \frac{\text{Area}}{\text{perímetro mojado}} = \frac{b \times Y}{b + 2Y} \quad (\text{Ec.3.10})$$

Sustituyendo el ancho de la unidad de mezcla rápida y la altura de agua en la misma para un caudal de 470 l/s en la ecuación 3.10:

$$R_H = \frac{2,02 \text{ m} \times 1,2 \text{ m}}{2,02 \text{ m} + (2 \times 1,2 \text{ m})} = 0,5484 \text{ m}$$

Para superficies de concreto el coeficiente de rugosidad de Manning es igual a 0,013 (Arboleda, 2000). Sustituyendo los valores de v y L calculados en el punto 3.2.2.1, el valor de R_H calculado y el factor de rugosidad de Manning en la ecuación 3.9 se obtiene que la pérdidas de carga por fricción en el mezclador rápido serán iguales a:

$$h_f = \frac{\left(\frac{0,2376 \text{ m}}{\text{s}}\right)^2 \times (0,013)^2}{(0,5484 \text{ m})^{\frac{4}{3}}} \times 17,11 \text{ m} = 2,2822 \times 10^{-4} \text{ m}$$

- **Pérdidas de carga por deformaciones del fluido debido a baffles o tabiques en la unidad de coagulación**

Considerando que la dirección del fluido dentro de la tanquilla es horizontal y que los tabiques no poseen perforaciones, éstas pérdidas de carga se calcularon a partir de las expresiones utilizadas para floculadores hidráulico de flujo horizontal (Arboleda, 2000):

$$h_D = \frac{KxN \times v^2}{2 \times g} \tag{Ec. 3.11}$$

Donde,

h_D :pérdida de carga por deformaciones del fluido

K : constante empírica = 3

N : número de tabiques = 2

v : velocidad promedio del fluido

g : gravedad estándar = 9,81 m/s²

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación 3.11 se determinó que las pérdidas de carga por deformaciones del fluido en la unidad de coagulación serán iguales a:

$$h_D = \frac{3 \times 2 \times \left(\frac{0,2376 \text{ m}}{\text{s}} \right)^2}{\frac{2 \times 9,81 \text{ m}}{\text{s}^2}} = 0,01339 \text{ m}$$

3.2.2.3. Potencia disipada en la unidad de coagulación y gradiente de velocidad

La potencia se calculó utilizando la ecuación 2.3 siendo H la sumatoria de las pérdidas de carga calculadas. El peso específico del agua a 23 °C es igual a 9778,65 N/m³ (Perry y Green, 2007) y el volumen de la unidad se obtuvo de la siguiente manera:

$$V = b \times L \times Y \quad (\text{Ec. 3.12})$$

Donde b es el ancho de la unidad, L el largo de la misma, representados en la figura 3.12, y Y la altura de líquido en la tanquilla. Sustituyendo estos parámetros en la ecuación 3.12:

$$V = 2,02 \text{ m} \times 9,77 \text{ m} \times 1,2 \text{ m} = 23,6825 \text{ m}^3$$

Sustituyendo los valores de peso específico, caudal, volumen y pérdidas de carga en la ecuación 2.3 se determinó que la potencia disipada en la unidad de coagulación es igual a:

$$P = \frac{\left(9778,65 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \right) \times \left(\frac{4701}{\text{s}} \right) \times \left(\frac{1 \text{ m}^3}{10001} \right)}{23,6825 \text{ m}^3} \times (2,8222 \times 10^{-4} \text{ m} + 0,01339 \text{ m})$$

$$P = 2,6549 \text{ J/m}^3$$

Para el cálculo del gradiente del gradiente se utilizó la ecuación 2.1, en la cual se sustituyó la potencia calculada y la viscosidad del fluido a 23°C, obteniéndose así:

$$G = \sqrt{\frac{2,6549 \frac{\text{J}}{\text{m}^3}}{\frac{0,000933\text{Kg}}{\text{m}^3 \text{s}}}} = 53,34 \text{ s}^{-1}$$

3.2.3. Tiempo de retención en la unidad de mezcla rápida

El tiempo de retención de esta unidad esta dado por la ecuación 2.2, en la que se sustituyó el valor de caudal de entrada a la unidad y el volumen calculado de la misma, obteniéndose:

$$t = \left(\frac{23,6825 \text{ m}^3}{\left(\frac{470\text{l}}{\text{s}} \right) \times \left(\frac{1\text{m}^3}{1000\text{l}} \right)} \right) = 72,24 \text{ s}$$

3.2.4. Descripción de la unidad de mezcla lenta o de floculación

La planta Juan José Codallos cuenta con tres unidades de floculación de flujo horizontal, cuyas paredes son de concreto. Poseen cuatro paletas giratorias de eje horizontal y cinco pantallas de madera que forman cuatro cámaras de floculación en cada unidad. Las paletas rotatorias actualmente no funcionan, por lo que se consideró que en los floculadores existe únicamente un gradiente de velocidad hidráulico. Cada una de estas unidades, posee una longitud de 11,66 m y 13,8 m de ancho y la distancia entre cada una de las pantallas es de 2,76 m. A la entrada de cada floculador hay 13 compuertas de guillotina de 20 cm de diámetro cada una, todas estas totalmente abiertas.

3.2.5. Cálculo del gradiente de velocidad

Al igual que en la unidad de mezcla rápida, es necesario conocer las pérdidas de cargas producidas en la unidad de floculación, las cuales en este caso son originadas por accesorios, como son las compuertas ubicadas a la entrada de cada unidad, por fricción y por deformaciones del fluido debido a las pantallas que este caso se consideraron como baffles o tabiques puesto que de alguna manera estas promueven la deformación del fluido.

- **Pérdidas de carga locales o debido a accesorios en los floculadores**

Este tipo de pérdidas se calcularon utilizando la siguiente expresión:

$$h_a = \frac{1}{2} \times \frac{v^2}{g_c} \times \sum_{i=1}^n e_i \quad (\text{Ec. 3.13})$$

Donde;

h_a : pérdida de carga debido a accesorios

v : velocidad del fluido (m/s)

g : factor de gravedad (m/s^2)

e : coeficiente de resistencia de cada accesorio

Debido a que las pérdidas locales son originadas por las 13 compuertas de guillotina presentes en la unidad y las cuales están totalmente abiertas, el coeficiente de resistencia para este tipo de accesorios, cuyo comportamiento hidráulico es igual al de los orificios, se calcula a partir de la siguiente ecuación (Crane, 1992):

$$e = 0,08 \times f \quad (\text{Ec. 3.14})$$

Donde f es el factor de fricción correspondiente al material del tipo de accesorio, y en este caso las compuertas u orificios son de concreto, cuyo material posee un factor de fricción igual a 0,7, por lo tanto, al sustituir el valor de f en la ecuación 3.14 y considerando el número de compuertas por cada unidad se obtiene:

$$\sum_{i=1}^{n=13} e_i = 13 \times 0,08 \times 0,7 = 0,728$$

Las tres unidades de floculación operan al mismo tiempo, y debido a que no se pudo realizar una medición exacta del caudal de entrada de cada unidad, se determinó la velocidad del flujo a través de las compuertas utilizando la ecuación 2.4 de la siguiente manera:

$$v = \frac{Q}{A} = \left(\frac{\frac{Q}{3}}{\frac{13}{A}} \right)$$

(Ec. 3.14)

Calculándose el área a partir de la siguiente ecuación:

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

(Ec. 3.15)

Donde:

A: área

D: diámetro de las compuertas

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación 3.15:

$$A = \left(\frac{\pi \left(20 \text{ cm} \times \left(\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right) \right)^2}{4} \right) = 0,0314 \text{ m}^2$$

Sustituyendo el valor de área calculado en la ecuación 3.14 se obtiene que la velocidad del fluido a través de las compuertas es:

$$v = \left(\frac{\left(\frac{470 \frac{\text{l}}{\text{s}}}{3} \right) \times \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{l}} \right)}{0,01314 \text{ m}^2} \right) = 0,3836 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Una vez conocido el valor del coeficiente de resistencia de los accesorios y el valor de la velocidad del fluido de entrada a las unidades de floculación se sustituyó en la ecuación 3.13 y se obtuvo que las pérdidas de carga debido a las compuertas serán iguales a:

$$h_a = \frac{1}{2} \times \left(\frac{\left(0,3674 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{9,81 \text{ m/s}^2} \right) \times (0,728) = 5,4600 \times 10^{-3} \text{ m}$$

- **Pérdidas de carga por fricción en las unidades de floculación**

El movimiento del fluido dentro de estas unidades genera fricción en las paredes del floculador debido a la velocidad media del mismo dentro de estas. Para calcular el área ocupada por el fluido en los floculadores y radio hidráulico, se consideró que el nivel de agua en los mismos será igual al nivel de agua en el coagulador ($Y = 1,2 \text{ m}$) menos las pérdidas de carga generadas por las compuertas en cada unidad de floculación. En base a esto, utilizando las ecuaciones 3.7 y 3.10 y recordando las dimensiones de las unidades se calculó el área y el radio hidráulico obteniéndose lo siguiente:

$$A = 13,81 \text{ m} \times (1,2 \text{ m} - 5,0085 \times 10^{-3} \text{ m}) = 16,5028 \text{ m}^2$$

$$R_H = \frac{13,81 \text{ m} \times (1,2 \text{ m} - 5,0085 \times 10^{-3} \text{ m})}{13,81 \text{ m} + 2 \times (1,2 \text{ m} - 5,0085 \times 10^{-3} \text{ m})} = 1,0186 \text{ m}$$

La velocidad media del fluido se determinó utilizando la ecuación 3.14, en la cual se sustituyó el caudal y el área calculada, siendo dicha velocidad igual a:

$$v = \left(\frac{\left(\frac{\left(470 \frac{\text{l}}{\text{s}}\right) \times \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{l}}\right)}{\frac{3}{13}} \right)}{16,5028 \text{ m}^2} \right) = 9,5037 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

Considerando que el fluido se mueve en sentido horizontal a lo largo de los floculadores, la longitud recorrida por este será igual a 11,66 m. Utilizando la ecuación 3.9 y sustituyendo los valores calculados de velocidad y radio hidráulico así como la longitud recorrida por el fluido y el valor del coeficiente de rugosidad de Manning para superficies

de concreto se obtiene que las pérdidas de carga por fricción en las unidades de floculación son iguales a:

$$h_f = \left(\frac{(9,5037 \times 10^{-3} \text{ m/s})^2 \times (0,013)^2}{(1,0186 \text{ m})^3} \right) \times (11,66 \text{ m}) = 1,7357 \times 10^{-7} \text{ m}$$

- **Pérdidas de carga debido a las pantallas o tabiques en los floculadores**

Entre cada tabla de madera que forman las pantallas en los floculadores, existe una separación de 2 cm, por lo que se consideró la velocidad del fluido despreciable a través de esos espacios. Las pérdidas de carga generadas por estos tabiques, son proporcionales a la carga de velocidad del fluido, y se determinaron a partir de la ecuación 3.11, siendo N en este caso igual al número de pantallas (N=5). Sustituyendo en dicha expresión los valores calculados en el ítem anterior, correspondientes al área ocupada por el fluido y la velocidad media del mismo en las unidades, se obtiene:

$$h_D = \frac{3 \times 5 \times (9,5037 \times 10^{-3} \text{ m/s})^2}{2 \times 9,81 \text{ m/s}} = 6,9054 \times 10^{-5} \text{ m}$$

3.2.5.1. Potencia disipada y gradiente de velocidad en las unidades de floculación

De la misma manera que en la unidad de mezcla rápida, se determinó la potencia disipada en estas unidades, utilizando la ecuación 2.3, calculándose el volumen de los floculadores mediante la ecuación 3.12 de la siguiente manera:

$$V = 13,81 \text{ m} \times 11,66 \text{ m} \times (1,2 \text{ m} - 5,0085 \times 10^{-3} \text{ m}) = 192,423 \text{ m}^3$$

Sustituyendo este valor de volumen y los valores de las pérdidas de carga calculados en la ecuación 2.3 se obtuvo un valor de potencia igual a:

$$P = \frac{\left(9778,65 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}\right) \times \left(\left(\frac{470\text{l}}{\text{s}}\right) \times \left(\frac{1\text{m}^3}{1000\text{l}}\right)\right) \times (5,0085 \times 10^{-3} \text{ m} + 1,590 \times 10^{-7} \text{ m} + 6,3254 \times 10^{-5} \text{ m})}{192,423 \text{ m}^3}$$

$$P = 0,1322 \text{ J/m}^3$$

Utilizando la ecuación 2.1 en la cual se sustituyó el valor de potencia obtenido, se determinó que el gradiente de velocidad en las unidades de floculación o mezcla lenta es:

$$G = \sqrt{\frac{0,1322 \frac{\text{J}}{\text{m}^3}}{\frac{0,000933 \text{ Kg}}{\text{m} \times \text{s}}}} = 12,0139 \text{ s}^{-1}$$

3.2.6. Tiempo de retención en las unidades de floculación

Al igual que en la tanquilla de mezcla rápida se determinó el tiempo de retención en los floculadores utilizando la ecuación 2.2. Sustituyendo el volumen calculado cuyo valor obtenido fue $192,423 \text{ m}^3$ en dicha ecuación se determinó que el tiempo de retención de estas unidades es:

$$t = \frac{192,423 \text{ m}^3}{\left(\frac{470\text{l}}{\text{s}}\right) \times \left(\frac{1\text{m}^3}{1000\text{l}}\right)} = 1282,82 \text{ s} \cong 21 \text{ min}$$

3.3. Determinación de la dosis de coagulante requerida considerando el gradiente de velocidad hidráulico real de la planta

Para llevar a cabo el desarrollo de esta etapa, se hizo necesario verificar que los gradientes calculados en la etapa anterior, correspondían a los gradientes reales de la planta. El desarrollo de esta etapa está basado en la realización de pruebas de jarras y en la observación del comportamiento de la planta en función a los resultados obtenidos en las pruebas realizadas.

3.3.1. Verificación de los gradientes de velocidad calculados

Para verificar que los gradientes calculados corresponden a los gradientes reales de la planta, se realizaron 15 pruebas de jarras cuyos resultados en cuanto a calidad de agua clarificada se refiere, fueron comparados con los obtenidos en planta a una determinada dosis de coagulante aplicada. Para adaptar el gradiente de velocidad hidráulico de la planta a las pruebas de jarras realizadas, previamente se realizó una conversión de unidades de estos valores, debido a que fueron obtenidos en unidades de s^{-1} y para realizar las pruebas de jarras es necesario expresarlos en unidades de revoluciones por minuto (rpm), lo cual representa la velocidad con que giran las paletas del equipo utilizado, generando cierta turbulencia del fluido en las jarras. Para transformar las unidades se utilizó la expresión de Bhole (ENOSHA, 2007):

$$\text{rpm} = 3 \times G^{0.8} \quad (\text{Ec. 3.16})$$

Donde;

rpm: revoluciones por minuto

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

Sustituyendo los gradientes de velocidad calculados para las unidades de coagulación y de floculación, se obtiene lo siguiente:

► **Gradiente de velocidad en la unidad de coagulación**

$$\text{rpm} = 3 \times (53,3440 s^{-1})^{0.8} = 72,2420 \cong 72$$

► **Gradiente de velocidad en la unidad de floculación**

$$\text{rpm} = 3 \times (12,0139 s^{-1})^{0.8} = 21,9213 \cong 22$$

Este cálculo se realizó para cada uno de los gradientes de velocidad obtenidos a los diferentes caudales de operación de la planta Juan José Codallos y los resultados obtenidos se presentan en la tabla 3.6, mostrada a continuación.

Tabla 3.6. Gradientes de velocidad y tiempos de retención de las unidades de coagulación y floculación a los caudales más comunes de operación de la planta

	UNIDAD DE COAGULACIÓN			UNIDAD DE FLOCULACIÓN		
	Gradiente de velocidad			Gradiente de velocidad		
caudal (l/s)	S ⁻¹	rpm	Tr (min)	S ⁻¹	rpm	Tr (min)
400	37,45	54,44	1,06	9,42	18,05	24,05
410	38,87	56,08	1,04	9,78	18,59	23,46
420	45,06	63,12	0,93	10,14	19,14	22,90
430	46,68	64,92	0,91	10,50	19,69	22,36
450	49,97	68,56	0,87	11,25	20,80	21,36
470	53,34	72,24	0,83	12,01	21,92	20,44
500	58,53	77,81	0,78	13,18	23,61	19,20

3.3.2. Pruebas de jarras realizadas para verificar los gradientes calculados

Para realizar las pruebas, se deben cumplir los siguientes pasos:

1. Verificar la dosis de coagulante aplicada en planta y determinar la calidad del agua cruda y del agua clarificada proveniente de los sedimentadores de la planta, en función de la turbidez, color y pH.
2. Agregar un litro de agua cruda en un beaker.
3. Encender el equipo de pruebas de jarras y graduar el regulador de velocidad del equipo en 69 rpm durante un minuto (aproximadamente el tiempo de retención calculado).

4. Agregar la dosis de coagulante aplicada en planta equivalente en ppm, al beaker con agua cruda.
5. Transcurrido el minuto, reducir la velocidad de las paletas de agitación a 21 rpm durante 21 minutos.
6. Una vez finalizado el tiempo antes mencionado, se apagó el equipo para detener la agitación, sacar la paleta del beaker con cuidado para evitar la ruptura de los flóculos.
7. Dejar sedimentar los flóculos formados durante 30 minutos
8. Extraer con una pipeta, una muestra de 50 ml de agua clarificada y realizar análisis de turbidez, color y pH.

Al realizar las pruebas de jarras se evaluó cuantitativamente en cada jarra el tamaño del flóculo, el cual se determina según el índice de willcomb, observado en la tabla 3.7, presentada a continuación:

Tabla 3.7. Índice de floculación de Willcomb (Arrieta, 2000)

INDICE DE WILCOMB	
0	Flóculo coloidal sin 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	Buen flóculo que se deposita fácil pero no completamente
10	Excelente flóculo que se deposita todo dejando el agua cristalina

Las pruebas de jarra se realizaron utilizando como coagulante sulfato de aluminio libre de hierro. A continuación, en la tabla 3.8, se muestran los resultados de la prueba de jarra realizada el día 27 de julio del presente año. Los resultados de los análisis realizados al agua clarificada proveniente de las pruebas de jarra realizadas deben coincidir con los resultados de los análisis realizados en el paso 1. Dichos resultados se presentan en el anexo F.

Tabla 3.8. Prueba de jarra realizada para verificar los gradientes de velocidad calculados

FECHA	CAUDAL (l/s)	HORA DE INICIO	HORA DE CULMINACIÓN	CALIDAD DEL AGUA CRUDA			
				TURBIDEZ (NTU)	pH	COLOR (UC)	
27/07/2011	470	10:20am	11:10 am	4,6	7,4	5	
DOSIS DE COAGULA NTE APLICADA EN PLANTA (ppm)	CALIDAD DEL AGUA CLARIFICADA PROVENIENTE DE LOS SEDIMENTADORES			GRADIENTE DE VELOCIDAD (rpm)		TIEMPO DE RETENCIÓN (min)	
	TURBIDEZ (NTU)	COLOR (UC)	PH	MEZCLA RÁPIDA	MEZCLA LENTA	MEZCLA RÁPIDA	MEZCLA LENTA
4	3,8	5	7,3	72	22	1	20
JARRA	DOSIS DE COAGULANTE (ppm)	ÍNDICE DE WILLCOM B	TIEMPO DE FORMACIÓN DE FLÓCULOS (MIN)	CALIDAD DEL AGUA CLARIFICADA			
				TURBIDEZ (NTU)	COLOR (UC)	PH	
1	4	2	5	3,6	5	7,3	

3.3.3. Dosis de coagulante requerida para cumplir con el proceso de potabilización

Una vez verificados los gradientes de velocidad calculados, se realizaron 15 pruebas de jarras que permitieron encontrar dosis de coagulante requerida para cumplir con el proceso de potabilización en función a la calidad el agua cruda. Antes de realizar los ensayos de jarra se debe determinar la calidad del agua cruda, y a diferencia de las pruebas realizadas para verificar el gradiente de velocidad, en este caso se deben utilizar un número mayor de beakers.

Para esta etapa se utilizaron cuatro beakers de 1000 ml, los cuales fueron llenados con agua cruda, aplicando posteriormente una dosis de coagulante (sulfato de aluminio) diferente en cada uno. Luego de haber aplicado las distintas cantidades de sulfato de aluminio a los beakers que contienen el agua a tratar, se procedió de la misma manera que en la etapa 3.3.2 a partir del paso número 3.

Las pruebas de jarras fueron realizadas durante 15 días y mostró poca variación de las características del agua cruda durante la evaluación realizada. Se consideraron los gradientes de velocidad encontrados al igual que los tiempos de retención de las unidades de coagulación y floculación. Los resultados de las pruebas de jarras realizados se presentan en el anexo F en los cuales se puede observar las dosis encontradas de coagulante para distintos caudales y distintos valores de turbidez del agua cruda, tal como se muestra a continuación en la tabla 3.9:

Tabla 3.9. Prueba de jarra realizada para determinar la dosis requerida de coagulante.

FECHA	CAUDAL (l/s)	HORA DE INICIO	HORA DE CULMINACIÓN	CALIDAD DEL AGUA CRUDA		
				TURBIDEZ (NTU)	pH	COLOR (UC)
23/08/2011	450	9:40 am	10:55 am	5	7,1	8
TIEMPO DE RETENCIÓN (MIN)		GRADIENTE DE VELOCIDAD (rpm)			DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE (ppm)	
MEZCLA RÁPIDA	MEZCLA LENTA	MEZCLA RÁPIDA	MEZCLA LENTA	1,5		
1	21	69	20,80			
JARRA	DOSIS DE COAGULANTE (ppm)	ÍNDICE DE WILLCOB	TIEMPO DE FORMACIÓN DE FLÓCULOS (MIN)	CALIDAD DEL AGUA CLARIFICADA		
				TURBIDEZ (NTU)	COLOR (UC)	pH
1	1,5	2	1	2	2	7
2	3	2	12	4,4	4	7
3	4,5	2	12	4	4	6,9
4	6	0	20	4,9	5	6,7

3.4. Determinación de la eficiencia de las diferentes unidades operativas del sistema de potabilización

Esta etapa comprende el cálculo de la eficiencia de las unidades y la comparación de los resultados obtenidos con parámetros correspondientes al diseño de las mismas. La eficiencia de las unidades de coagulación y floculación se determinó en función al gradiente de velocidad calculado, mientras que la eficiencia de las unidades de

sedimentación y filtración fue determinada en función a la remoción de turbiedad del agua y de la calidad del agua potable.

3.4.1. Desarenador

Para conocer las características de la unidad desarenadora de la planta Juan José Codallos se realizó una observación directa en el sitio de ubicación de la misma, tomando a su vez medidas de las dimensiones de esta. Consiste en un cajón distribuidor, de 15,20 m de largo y que consta de dos unidades de sedimentación, las cuales poseen 7,80 m de ancho y una profundidad útil de 1,80 m cada uno. Esta unidad está provista de compuertas deslizantes, a la entrada posee una válvula mariposa de 36 pulgadas de diámetro y una malla metálica que evita el paso de objetos grandes, tales como hojas, peces, entre otros, a la unidad y posee una descarga de 24 pulgadas, opera a un caudal de 700 l/s aproximadamente.

Para determinar la eficiencia de esta unidad se calculó el tiempo de retención de la misma a fin de compararlo con el valor de diseño establecido para estas. Se realizaron análisis de laboratorio del agua de entrada y del agua clarificada proveniente esta unidad con el objeto de conocer el porcentaje de turbidez que esta puede remover. Estos análisis fueron realizados durante un período de 30 días.

Para determinar el porcentaje remoción de turbidez se utilizó la ecuación 2.5 para verificar la eficiencia en función de este parámetro, sustituyendo los valores de la tabla 3.10 en la ecuación mencionada se obteniéndose:

Tabla 3.10. Turbidez del agua a la entrada y salida del desarenador

Fecha	Turbidez de entrada (NTU)	Turbidez de salida (NTU)
08/08/2011	1,0	0,8
09/08/2011	6,0	5,7
10/08/2011	8,0	6,0
11/08/2011	7,0	3,5
12/08/2011	12,0	9,0
15/08/2011	10,0	5,0
16/08/2011	2,9	1,3
17/08/2011	10,4	7,4
18/08/2011	7,4	5,1
19/08/2011	3,0	2,2
22/08/2011	14,5	10,0
23/08/2011	14,0	12,5
24/08/2011	5,5	4,6

Tabla 3.10. Turbidez del agua a la entrada y salida del desarenador (Continuación)

Fecha	Turbidez de entrada (NTU)	Turbidez de salida (NTU)
25/08/2011	9,7	7,6
26/08/2011	2,9	2,4
29/08/2011	2,6	2,5
30/08/2011	3,6	3,0
31/08/2011	12,0	10,0
01/09/2011	4,1	3,0
02/09/2011	4,0	2,0
05/09/2011	6,0	3,0
06/09/2011	7,0	5,2
07/09/2011	6,0	3,0
08/09/2011	17,0	8,5
09/09/2011	3,0	1,5
12/09/2011	2,4	1,8
13/09/2011	4,8	3,6
14/09/2011	2,9	2,0
15/09/2011	4,5	2,25
16/09/2011	4,8	3,3
17/09/2011	5,0	4,0

$$\text{Eficiencia} = \left(1 - \frac{0,8}{1,2}\right) = 0,33$$

Este cálculo se repitió para cada valor de la tabla antes mencionada y los resultados obtenidos se muestran en la tabla G1 del anexo G. El tiempo de retención de esta unidad se calculó de mediante la ecuación 2.2, calculándose a su vez el volumen del desarenador utilizando la ecuación 3.12, siendo el nivel de agua en esta unidad para el caudal antes mencionado igual a 1,50 m. Sustituyendo este valor, así como las dimensiones mostradas en la figura 3.15 en la ecuación 3.12, se obtiene:

$$V=15,20 \text{ m} \times 7,8 \text{ m} \times 1,50 \text{ m} = 177,84 \text{ m}^3$$

$$t = \frac{177,84 \text{ m}^3}{\left(\frac{700\text{l}}{\text{s}}\right) \left(\frac{1\text{m}^3}{1000\text{l}}\right)} = 254,05 \text{ s} = 4,23 \text{ min}$$

3.4.2. Unidades de coagulación y floculación

La eficiencia de estas unidades está basada principalmente en los gradientes de velocidad y tiempos de retención de las mismas (Vargas, 2004). En vista de que las unidades de coagulación y floculación de la planta Juan José Codallos actualmente presentan comportamiento hidráulico, los gradientes de velocidad y tiempos de retención calculados fueron comparados con los gradientes y tiempos de retención de diseño establecidos en la bibliografía para unidades con este tipo de comportamiento. En función a esto se calcularon porcentajes de desviación de los valores calculados con respecto a los teóricos, utilizando la siguiente ecuación:

$$\%D = \left| \frac{\text{valor real} - \text{valor teórico}}{\text{valor teórico}} \right| \times 100 \quad (\text{Ec.3.17})$$

El gradiente de velocidad de diseño establecido para las unidades de coagulación de tipo hidráulico varía en el rango de 1000-3000 s^{-1} y el tiempo de retención es igual a 1 minuto (Najul, Blanco y Alberdi, 2005). Sustituyendo el valor mínimo del rango establecido por el diseño y los valores de gradientes de velocidad calculados en la etapa 3.2 en la ecuación 3.17 se obtiene:

$$\%D = \left| \frac{53,34 \text{ s}^{-1} - 1000 \text{ s}^{-1}}{1000 \text{ s}^{-1}} \right| \times 100 = 95,00\%$$

Estos cálculos se realizaron para cada valor determinado de gradiente de velocidad de mezcla rápida. De igual manera se calculó el porcentaje de desviación del tiempo de retención de la unidad de coagulación obteniéndose como resultado lo siguiente:

$$\%D = \left| \frac{72,2 \text{ s} - 60 \text{ s}}{60 \text{ s}} \right| \times 100 = 20,29\%$$

Del mismo modo se determinaron los porcentajes de desviación respecto a los gradientes de velocidad calculados y tiempo de retención de las unidades de floculación de la planta Juan José Codallos. El gradiente de velocidad mínimo de diseño establecido para unidades de floculación hidráulica es igual a 10 s^{-1} y el tiempo de retención de 25 minutos (Najul, Blanco y Alberdi, 2005), sustituyendo estos datos, así como los valores del gradiente de velocidad y tiempos de retención calculados en la etapa 3.2 para las unidades de floculación, en la ecuación 3.17, se obtiene:

$$\%D = \left| \frac{12,01 \text{ s}^{-1} - 10 \text{ s}^{-1}}{10 \text{ s}^{-1}} \right| \times 100 = 20,1\%$$

Calculando el porcentaje de desviación respecto al tiempo se obtiene lo siguiente:

$$\%D = \left| \frac{21 \text{ min} - 25 \text{ min}}{25 \text{ min}} \right| \times 100 = 18,2\%$$

3.4.3. Sedimentadores

La planta Juan José Codallos cuenta con tres unidades rectangulares de sedimentación, de flujo horizontal ascendente. Cada unidad mide 47,30 m de largo, 13,8 m de ancho y una profundidad útil de 3 m. Al igual que para la unidad desarenadora, para determinar la eficiencia de estas unidades se realizaron análisis fisicoquímicos que permitieron verificar el porcentaje de remoción de turbidez del agua.

Los porcentajes de remoción de turbidez se determinaron a partir de la ecuación 2.5, en la cual se sustituyeron los datos de la tabla 3.11.

Tabla 3.11. Turbidez del agua de entrada y salida de los sedimentadores

Fecha	turbidez de entrada (NTU)	turbidez de salida (NTU)		
		Sedimentador N° 1	Sedimentador N° 2	Sedimentador N° 3
08/08/2011	6,0	3,2	3,2	3,4
09/08/2011	8,0	3,0	1,5	1,5
10/08/2011	7,5	3,7	3,4	1,9
11/08/2011	12,0	3,2	1,4	1,7
12/08/2011	10,0	1,0	0,9	0,9
15/08/2011	3,0	1,0	1,0	2,8
16/08/2011	2,9	1,1	1,0	0,8
17/08/2011	5,8	7,2	6,6	7,8
18/08/2011	2,9	2,0	2,0	2,1
19/08/2011	10,7	6,6	6,4	6,9

**Tabla 3.11. Turbidez del agua de entrada y salida de los sedimentadores
(Continuación)**

Fecha	turbidez de entrada (NTU)	turbidez de salida (NTU)		
		Sedimentador N° 1	Sedimentador N° 2	Sedimentador N° 3
22/08/2011	7,8	6,9	9,2	7,2
23/08/2011	10,4	7,1	6,9	7,0
24/08/2011	14,3	11,1	11,2	11,1
25/08/2011	17,4	10,4	14,5	17,0
26/08/2011	14,9	14	12,5	7,5
29/08/2011	5,8	5,5	4,6	5,4
30/08/2011	16,2	9,7	7,6	7,7
31/08/2011	3,9	2,9	2,4	2,6
01/09/2011	4,5	2,6	2,5	2,7
02/09/2011	9,8	3,6	3,4	3,0
05/09/2011	61,9	12,0	10,0	7,0
06/09/2011	5,0	4,1	3,0	3,0
07/09/2011	7,4	4,0	4,0	2,0
08/09/2011	22,0	6,0	7,0	4,0
09/09/2011	10,4	7,1	7,0	7,0
12/09/2011	10,0	6,0	6,0	5,0
13/09/2011	25,0	15,0	15,0	12,5
14/09/2011	2,5	1,5	1,5	1,2
15/09/2011	4,0	2,4	1,8	2,0
16/09/2011	8,0	4,8	3,2	4,0

Para efectos de cálculo se consideró el sedimentador 1 y los datos de turbidez obtenidos en los primeros muestreos correspondientes al mismo, obteniéndose los siguientes resultados:

$$\text{Eficiencia} = 1 - \frac{3,2}{6,0} = 0,47$$

Así mismo se calculó el tiempo de retención de cada sedimentador, utilizando las ecuaciones 3.12 y 2.2. Tomando en cuenta las dimensiones antes mencionadas, correspondientes a cada unidad de sedimentación y la altura de líquido en las unidades para un caudal de operación de la planta de 470 l/s (Y) igual a 2 m, se sustituyeron dichos valores en la ecuación 3.12 obteniendo los siguientes resultados:

$$V = 47,30 \text{ m} \times 13,81 \text{ m} \times 2 \text{ m} = 1306,4 \text{ m}^3$$

Debido a que no se pudo realizar una medición exacta del caudal de operación de cada una de las unidades de sedimentación, se calculó el tiempo de retención de la siguiente manera:

$$t = \frac{1306,4 \text{ m}^3}{\left(\frac{(470 \frac{\text{l}}{\text{s}}) \times (\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}})}{3} \right)} = 8338,72 \text{ s} = 2,3 \text{ h}$$

3.4.4. Filtros

La planta Juan José Codallos consta de cuatro filtros, cuyos lechos filtrantes son mixtos y están formados por arena, antracita y grava. Estos, operan a gravedad y poseen canaletas que permiten recoger el agua de lavado de los mismos. Cada filtro posee una longitud de 7,3 metros y 7,05 metros de ancho. De la misma manera que se determinó cuan eficientes pueden ser las unidades anteriores se determinó la eficiencia de las unidades de filtración.

Además se realizaron análisis de laboratorio que permitieron verificar si el agua filtrada cumple con la normativa de calidad de agua potable. Se calculó el porcentaje de remoción de turbidez tomando como referencia la turbidez promedio del agua clarificada proveniente de los sedimentadores. En la tabla 3.12 se presentan los datos obtenidos en

cuanto a turbidez del agua de entrada y de salida de las unidades de filtración, siendo estos sustituidos en la ecuación 2.5.

Los resultados obtenidos de estos cálculos se presentan en el anexo G al igual que los resultados de los análisis de laboratorio realizados para verificar la calidad del agua filtrada, los cuales fueron realizados bajo los métodos estandarizados para el análisis de agua potable y aguas residuales, descritos en la etapa 3.1.3 y fueron comparados con los valores establecidos la normativa sanitaria de calidad de agua potable establecida, según Gaceta Oficial N° 36.395 de la República Bolivariana de Venezuela.

Tabla 3.12. Turbidez del agua de entrada y salida de los filtros

Fecha	Turbidez de entrada (NTU)	Turbidez de salida (NTU)
08/08/2011	3,4	1,4
09/08/2011	1,5	0,5
10/08/2011	1,9	0,9
11/08/2011	1,7	1,3
12/08/2011	0,9	0,9
15/08/2011	2,8	1,4
16/08/2011	0,8	0,8
17/08/2011	7,8	3,5
18/08/2011	2,1	1,9

Tabla 3.12. Turbidez del agua de entrada y salida de los filtros (Continuación)

Fecha	Turbidez de entrada (NTU)	Turbidez de salida (NTU)
22/08/2011	7,0	3,5
23/08/2011	7,0	5,6
24/08/2011	11,1	5,0
25/08/2011	17,0	8,0
26/08/2011	7,5	3,0
29/08/2011	5,0	2,0
30/08/2011	7,7	3,5
31/08/2011	2,6	0,9
01/09/2011	2,0	1,0
02/09/2011	3,0	1,0
05/09/2011	7,0	3,5
06/09/2011	3,0	1,5
07/09/2011	2,0	1,0
08/09/2011	4,0	1,8
09/09/2011	7,0	3,5
12/09/2011	5,0	2,0
13/09/2011	12,5	5,0
14/09/2011	1,2	0,9
15/09/2011	2,0	0,9
16/09/2011	4,0	2,0

Considerando los valores de turbidez de entrada y salida obtenidos el día 08 de agosto del año en curso, y sustituyéndolos en la ecuación 2.5 se obtiene lo siguiente:

$$\text{Eficiencia} = 1 - \frac{2,4}{3,3} = 0,27$$

3.4.5. Análisis estadístico de los resultados obtenidos

Para analizar los resultados obtenidos se utilizó un método de frecuencia estadística, el cual permitió determinar una eficiencia global de las unidades de sedimentación y filtración descritas anteriormente, en función al porcentaje de remoción de turbidez más repetitivo obtenido para cada una de ellas. Tomando los datos mostrados en la tabla G-1 correspondiente a los resultados de eficiencia obtenidos para el sedimentador 1, y sustituyéndolos en la ecuación 2.6 como se muestra a continuación, para un valor de eficiencia en función a la remoción de turbidez igual a 47% cuya frecuencia absoluta es igual a 1, para un tamaño de muestra (N) igual a 30, se obtiene:

$$\%F_r = \left(\frac{1}{30}\right) \times 100 = 3,3\%$$

Este cálculo se realizó para cada uno de los datos presentados en la tabla G-1 correspondientes a las unidades de remoción de arena, sedimentadores y filtros de la planta Juan José Codallos y los resultados obtenidos se muestran en las tablas G-2, G-3 y G-4 del anexo G.

3.5. Equipos, materiales, sustancias y herramientas

3.5.1 Equipos

- Balanza digital, marca BEL rango de medición de 0 a 1000kg.
- Comparador visual de color Marca Hach.
- Estufa de esterilización, marca memmert, modelo 854.Rango (0 a 250 °C).
- Equipo para prueba de jarras, marca Velp, modelo JLT6.
- Incubadora de dos estantes,marca Termolyne, modelo I42300 con termómetro de 0,5 ° C de incremento. Rango (30 a 42°C).
- Kit para cloro libre y total, Marca Hach, modelo CN-66/-66f-66t.
- Lámpara UV fluorescente de 6 vatios, marca spectroline,modelo CM-10.
- Medidor de caudal, marca General Electric, modelo AT868w.
- pH metro/Conductímetro, marca HANNA HI4521.
- Sellador marca Quanti-Tray, modelo 2X.

- Turbidímetro digital de mesa, marca Hach 2100N. Rango de medición de 0 a 4000 NTU.
- Termómetro de mercurio graduado, rango de medición 0 a 300 °C.

3.5.2 Herramientas

- Microsoft Excel 2007. Microsoft Internet Explorer.

3.5.3 Materiales

- Beakers de 10, 50, 100 y 1000 ml.
- bandejas de 51 pocillos y de 97 pocillos para análisis bacteriológico.
- Celdas para turbidímetro.
- Envases plásticos de 1000 ml.
- Envases de vidrio boro silicato de tapa esmerilada.
- Erlenmeyer de 100 y 250 ml.
- Pipetas.
- Tubos Nessler de 50 ml.
- Tubos de ensayo.

3.5.4 Sustancias

- Acido sulfúrico.
- Acido clorhídrico.
- Alcohol etílico.
- Agua destilada.
- Cloroplatinato de potasio.
- Cloruro de cobalto.
- N, N-dietil-p-difeilendiamina (DPD).
- Reactivo Colilert
- Sal de rojo de metilo.
- Sal de sodio verde bromocresol.
- Sulfato de Aluminio.
- Tiosulfato de sodio.

Estos equipos, materiales y sustancias estuvieron disponibles en el laboratorio de la planta potabilizadora Juan José Codallos.

CAPÍTULO 4

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis de la fuente de abastecimiento de agua cruda

Para el análisis del agua que alimenta la planta Juan José Codallos, se realizaron una serie de actividades que permitieron conocer factores que pueden desmejorar la calidad del agua cruda, sin embargo, tomando ciertas medidas preventivas se puede evitar que la contaminación logre dañar tan importante fuente de agua superficial como lo es el río Cancamure. A continuación se presentan las diferentes etapas desarrolladas para llevar a cabo el análisis de la fuente.

4.1.1. Verificación de las condiciones ambientales y de sanidad de la fuente

A pesar del aspecto cristalino que a simple vista muestra el río Cancamure, las condiciones del mismo pudieran ser mejores si quienes habitan a su alrededor tomaran conciencia de la importancia que tiene mantener el buen estado su fuente de agua, evitando así, arrojar desechos sólidos y líquidos que amenazan el mantenimiento de la calidad de la misma a futuro.

Durante el período de observación de las condiciones de la fuente de abastecimiento y sus alrededores, se pudo verificar que esta se encuentra en buen estado, sin embargo, existe un factor importante que bacteriológicamente desmejora la calidad del agua y que en años venideros, debido al crecimiento de la población puede incrementar el grado de contaminación que actualmente presenta la fuente, tal es el caso de las aguas residuales que son vertidas al río, debido a que las comunidades que se encuentran a orillas de este no cuentan con servicios de desecho de dichas aguas. Así mismo, la cantidad de criaderos de ganado porcino, vacuno y aviar que existen en las cercanías del río altera la calidad bacteriológica del agua.

Para evitar el deterioro de la fuente de agua, la empresa debe planificar actividades que permitan mantener el buen estado de la misma, como por ejemplo implementar servicios de aguas residuales a las comunidades adyacentes, y realizar actividades de mantenimiento e informativas con dichas comunidades, a fin de documentarlas con respecto a la importancia que tiene mantener la calidad del agua del río Cancamure.

4.1.2. Descripción del sistema de captación de agua

El sistema de captación de agua con el que cuenta la planta Juan José Codallos, se encuentra en buen estado, cuenta con una tanquilla de descarga que permite el paso del gasto medio de la fuente superficial y su sistema de retención de sólidos permite un mejor funcionamiento de la unidad desarenadora, pues evita el paso de objetos que puedan perturbar el funcionamiento de la unidad antes mencionada.

Este sistema de captación está diseñado de tal manera que, aun cuando el paso de caudal a través de él sea máximo, no existan socavaciones en las laderas y fundaciones del dique. El sistema de compuertas deslizantes que posee la obra de captación de agua cruda de la planta Juan José Codallos, permite regular el caudal de ingreso y aislar la captación cuando se realiza el mantenimiento o limpieza de los componentes de la misma. Las compuertas son resistentes al empuje del agua y son manipuladas mediante un mecanismo manual sencillo que permiten su operación.

4.1.3. Caracterización fisicoquímica y bacteriológica del agua cruda

En la tabla 4.1, se muestran los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica y bacteriológica del agua cruda, procedente del río Cancamure que alimenta la planta Juan José Codallos, los cuales se compararon con los valores límites máximos permitidos para la clasificación de las aguas según el decreto N° 883 de la gaceta oficial N° 5.021 publicada el 18 de diciembre del año 1995, presentado en el anexo A.

Tabla 4.1. Características del agua cruda

CARACTERÍSTICAS	Xprom± desv.	DECRETO N° 883 (Aguas sub tipo 1A)
Turbidez (NTU)	9,36 ± 9,31	Menor de 25 UNT
Color (UC)	21,5 ± 29,6	Menor de 50 U Pt-Co
pH	7,3 ± 0,43	6,0 - 8,5
Sólidos disueltos totales(mg/l)	43,38 ± 14,1	1500 mg/l
Conductividad (µhmos/s)	63,99 ± 18,24	————
Alcalinidad (mg/l)	54,92 ± 12,43	————
Org. Coliformes totales (NMP)	1854,86	Promedio mensual menor a 2000 NMP por cada 100 ml.

De acuerdo con el decreto antes mencionado, el límite de turbidez establecido para las aguas del sub tipo 1A es de 25 NTU, observando los datos presentados en la tabla 4.1, se puede establecer que el agua procedente del río Cancamure cumple con los límites de turbidez para el tipo de agua mencionado, establecidos por la norma. Sin embargo cabe destacar que durante el periodo lluvioso la turbidez del agua del río Cancamure puede superar el límite de 25 NTU, pero esto no sucede con frecuencia.

- **pH:** En cuanto al pH, se observa en la tabla presentada, que este parámetro no excede el valor máximo establecido por la norma, manteniéndose este en un valor promedio de 7,3, por lo que también cumple con la caracterización fisicoquímica de las aguas tipo 1A establecida en el decreto 883, para las cuales el rango máximo de pH es de 6 – 8,5. Así mismo, el 96% de las muestras analizadas muestran que el color, del agua cruda que ingresa a la planta, generalmente no supera las 50 unidades, siendo el valor promedio obtenido de 21,5 UC, por lo que también esta característica cumple con la normativa exigida.

- ▶ **Sólidos disueltos totales:** La cantidad de sólidos disueltos totales presentes en el agua analizada, varía en un rango de 25 a 81 mg/l, por lo que aun en período lluvioso la presencia de sólidos disueltos totales promedio en el agua cruda no excede los 43,38 mg/l cuyo valor se observa en la tabla 4.1, notándose a su vez que no supera los límites establecidos por la norma, que en este caso para las aguas de tipo 1A no debe exceder los 1500 mg/l.
- ▶ **La alcalinidad y la conductividad** fueron otras características que se pudieron determinar durante los análisis realizados. Debe recordarse que la alcalinidad está relacionada con la presencia de carbonatos de calcio en el agua, que al mismo tiempo definen la dureza de la misma, según la norma la presencia de carbonatos no debe ser mayor a 500 mg/l en las aguas destinadas al uso doméstico e industrial como es el caso del agua procedente del río Cancamure, que de acuerdo con los datos mostrados en la tabla 4.1, la alcalinidad promedio del agua no supera los 54,92 mg/l.

La conductividad del agua es una expresión numérica de la capacidad de la misma para transportar la corriente eléctrica, y depende de la presencia de iones, de la concentración total de los mismos en el agua, su valencia y de la temperatura de medición. En el caso del río Cancamure, esta característica se encuentra en un rango variable de 20 a 100 $\mu\text{s/cm}$, sin embargo, el decreto 883 no establece límites máximos de conductividad para este tipo de aguas.

Todas las características que pudieron determinarse para establecer el tipo de agua tratada en la planta Juan José Codallos, coinciden con las características fisicoquímicas establecidas por la norma para las aguas de tipo 1A, lo que significa que el agua procedente del río Cancamure pudiera ser tratada mediante un proceso de filtración directa, ya que desde el punto de vista sanitario este tipo de agua puede ser acondicionada con la sola adición de desinfectantes, demostrándose así que el deterioro de las unidades de coagulación y floculación de la planta no impide la potabilización del agua.

De acuerdo con los datos obtenidos en el análisis bacteriológico del agua cruda, el 55% de las muestras analizadas durante la evaluación del sistema de potabilización de la planta Juan José Codallos, determinan que la presencia de organismos coliformes totales en el agua cruda supera los 2000 NMP por cada 100 ml de muestra analizada durante el período de estudio, cuyo valor promedio obtenido fue de 1854,86 NPM, condición que permite establecer que el agua del río Cancamure bacteriológicamente cumple con lo establecido en el decreto 883, para aguas del subtipo 1A.

4.1.4. Análisis estadístico de los resultados obtenidos

A continuación se muestra la tabla 4.2, en la cual pueden apreciarse los límites de control obtenidos para cada una de las características del agua estudiadas, así como también los valores promedios obtenidos de las mismas durante la evaluación del sistema de tratamiento de agua de la planta Juan José Codallos, dichos resultados determinan el comportamiento de las variables, el cual fue representado gráficamente.

Tabla 4.2. Promedio y límites de control de las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua cruda

CARACTERÍSTICA	$X_{\text{prom}} \pm \text{desviación}$	LSC	LIC
Turbidez (NTU)	9,36 \pm 9,31	1,064	17,652
Color (UC)	21,5 \pm 29,6	4,274	38,726
pH	7,3 \pm 0,43	6,7192	7,8328
Sólidos disueltos totales(mg/l)	43,38 \pm 14,1	24,4082	62,3518
Conductividad ($\mu\text{hmos/s}$)	63,99 \pm 18,24	40,6412	87,3428
Alcalinidad (mg/l)	54,92 \pm 12,43	39,7472	70,0928
Org. Coliformes fecales (NMP)	1517,08	360,6782	2673,4918
Org. Coliformes totales (NMP)	1854,86	958,1	2751,62

LSC: Límite superior de control

LIC: Límite inferior de control

En la figura 4.1 se muestra el comportamiento de la turbidez durante el período estudiado, observándose que dicha variable se mantiene dentro de los límites de control durante la mayor parte del tiempo, ubicándose a su vez por debajo de la línea de valor promedio calculado, lo que demuestra que la turbidez del agua cruda que alimenta la planta Juan José Codallos generalmente no supera las 10 unidades neflométricas de turbideztal como se muestra en la tabla 4.2.

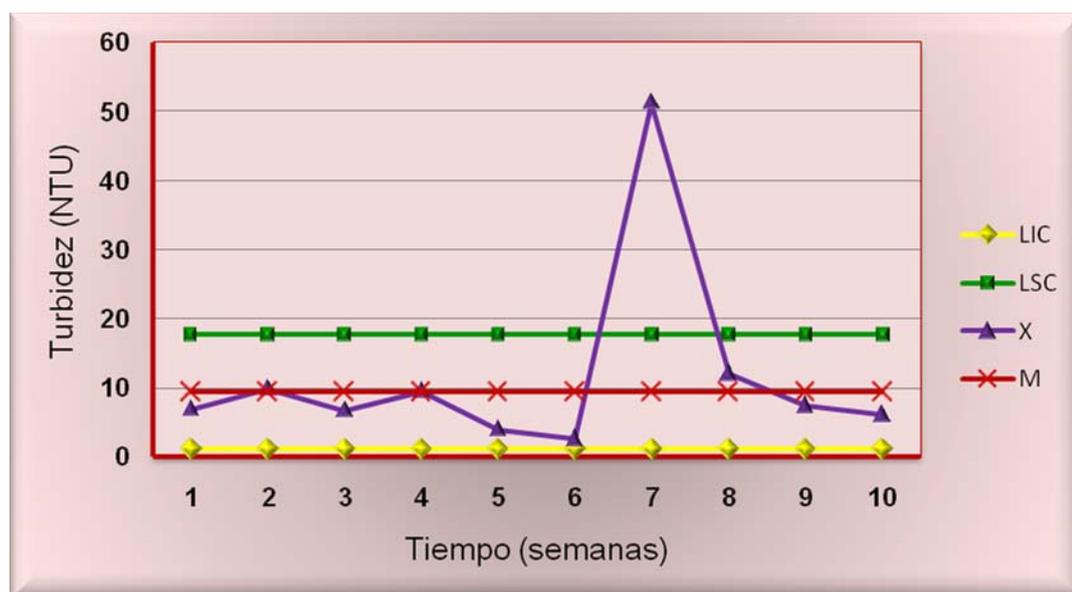


Figura 4.1. Variación de la turbidez del agua cruda

Sin embargo, en la gráfica se puede observar una desviación que excede el límite superior de control, que en estecaso, de acuerdo con la tabla 4.2, es de 17,65 NTU. Dicha desviación se debe a que durante la séptima semana de estudio se presentaron lluvias continuas que ocasionaron el crecimiento del río, logrando así que la turbidez del mismo durante dicho período variara entre 6,8 y 58 NTU.

No obstante, es notable que aun cuando las últimas cuatro semanas los análisis fueron realizados durante período lluvioso, la turbidez del agua cruda se mantuvo relativamente baja, por lo que no es alarmante el aumento de ella mostrado en la figura 4.1,

demostrándose así estadísticamente que en muy pocas oportunidades la turbidez del agua del río Cancamure supera los 25 NTU.

De la misma manera que la turbidez del agua cruda se mantiene dentro de los límites de control calculados y a su vez representados en la figura 4.1, se pudo demostrar estadísticamente que el pH del agua de alimentación de la planta Juan José Codallos es poco variable, sin embargo también puede ser susceptible al cambio de estación y tiende a disminuir durante períodos lluviosos tal como se muestra en la figura 4.2 presentada a continuación.



Figura 4.2. Variación del pH del agua cruda

A pesar de la cantidad de altos y bajos que muestra el comportamiento del pH del agua cruda en la gráfica, es evidente que esta variable no supera los límites de evaluación ni los límites establecidos por el decreto 883 para las aguas de tipo 1A. A partir de la séptima semana el pH disminuyó de manera considerable indicando así que durante el crecimiento de río debido a la constancia de las lluvias tiende a aumentar la acidez del agua, sin embargo durante períodos secos aumenta la basicidad de la misma. Estas variaciones no ocurren prolongadamente, pues también puede observarse en esta gráfica que generalmente el agua tiende a recuperar su neutralidad.

En la figura 4.3, se muestra como varía el color del agua durante el período de análisis, notándose que el comportamiento de esta variable está muy relacionado con la variación de turbidez, aumentando notablemente durante el período de lluvia. El agua proveniente del río Cancamure generalmente carece de color, sin embargo durante el crecimiento de este, existe arrastre de sólidos como troncos de árboles de tamaño moderado, entre otros, que al contacto con el agua producen la segregación de sustancias húmicas responsables de originar el color en el agua.

El color a su vez, está relacionado con la variación de pH, cambiando este de intensidad al mismo tiempo que cambia el pH (Arboleda, 2000). Nótese, que al aumentar el pH como se muestra en la figura 4.2, el color aumenta de manera proporcional. Esta característica también se mantiene dentro de los límites de control durante el período de análisis.

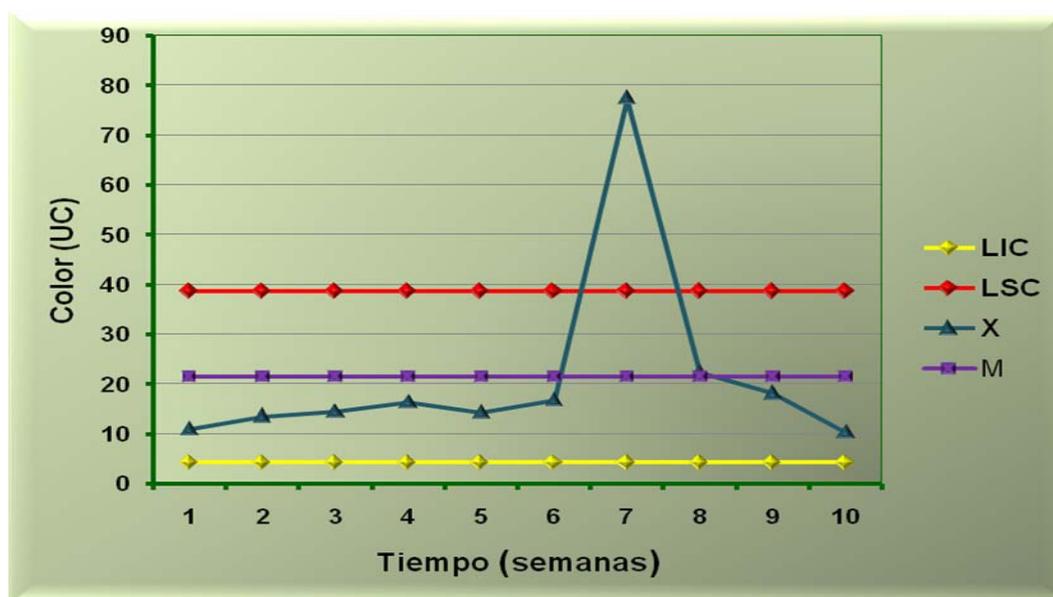


Figura 4.3. Variación del color del agua cruda

Con respecto a los sólidos disueltos totales, estadísticamente se pudo determinar que existe mucha variación de estos con el transcurso del tiempo, sin embargo más del 50% de los datos muestran que no existe mucha desviación en cuanto a la cantidad de sólidos

disueltos totales promedio calculada y mostrada en la figura 4.4. El río Cancamure, es altamente rocoso, lo que impide el excesivo arrastre de sólidos, ya que la porosidad de las rocas les permite comportarse como medio filtrante reteniendo entre ellas y en su superficie la mayor cantidad de sólidos presentes en el agua.

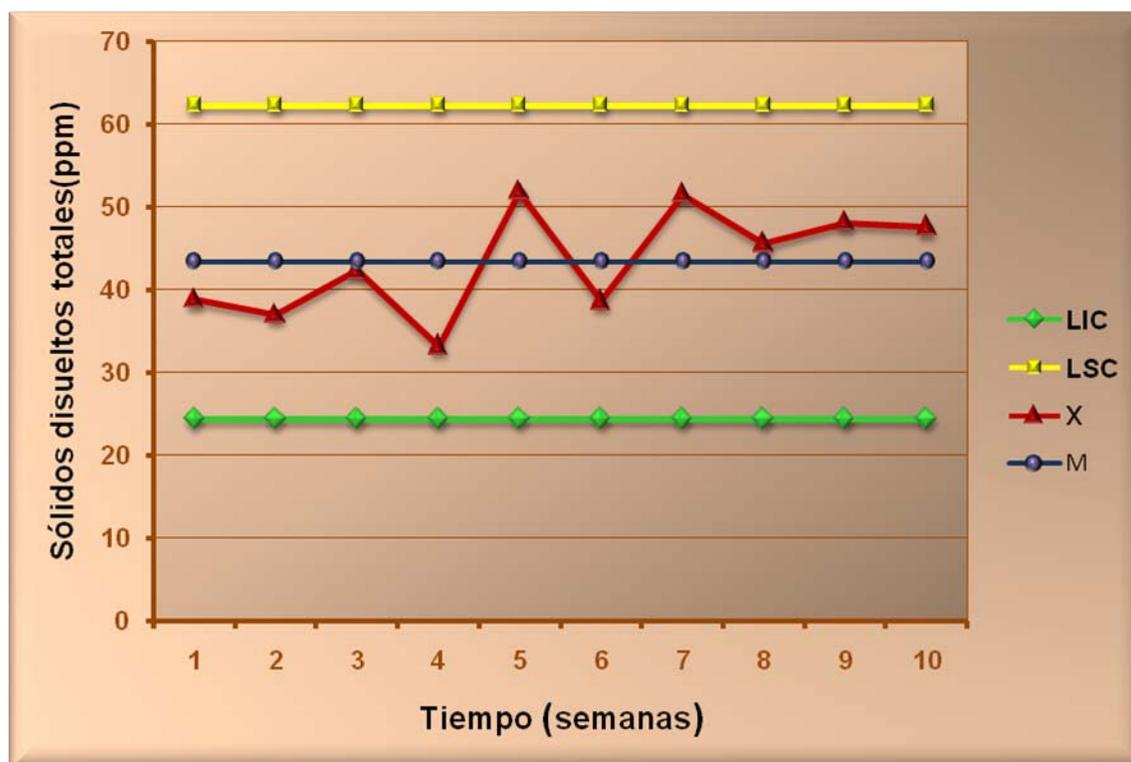


Figura 4.4. Variación de sólidos disueltos totales

De igual manera, la alcalinidad del agua de alimentación de la planta es muy estable. Debe recordarse que esta característica es ocasionada principalmente por los bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos presentes en ella y en menor grado por los boratos, silicatos y fosfatos que puedan estar presentes en la misma. De acuerdo a la figura 4.5 la alcalinidad de la fuente estudiada no muestra cambios bruscos ni siquiera en los períodos de cambio climático. Teóricamente, la fuente debe mantener el comportamiento en cuanto a alcalinidad se refiere, ya que de lo contrario podría indicar un cambio en la calidad de la misma y por ende del tipo de fuente (Barrenechea, 2004).

Por otra parte, la alcalinidad del agua también está relacionada con la dureza de ella, y tomando en cuenta los niveles alcanzados de alcalinidad representados gráficamente en la figura mencionada en el párrafo anterior, puede decirse que el agua es blanda, por lo que no requiere de tratamiento para disminuir la dureza de la misma.

Esta característica está relacionada con la remoción de turbidez del agua, ya que la alcalinidad aumenta la capacidad de precipitación de hidróxidos debido a la reacción del agua con los coagulantes, induciendo la formación de una masa esponjosa conocida como floculo de barrido que atrapa en su caída a los coloides y partículas suspendidas que se ven forzadas a decantar incorporadas dentro del precipitado que desciende (Arboleda, 2000).

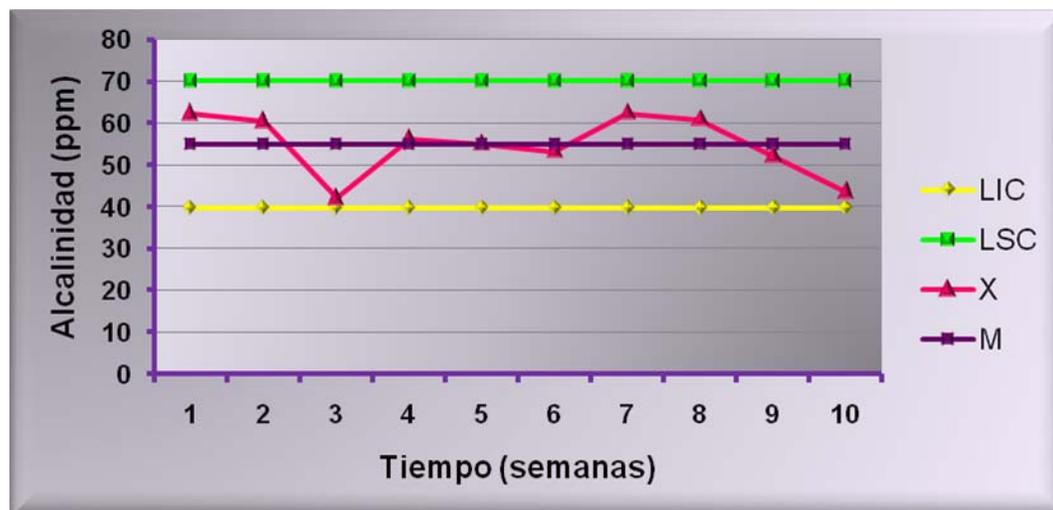


Figura 4.5. Variación de la alcalinidad del agua cruda

Otra de las características estudiadas del agua cruda fue la conductividad, cuyo comportamiento es representado a continuación en la figura 4.6, donde se puede apreciar que esta se mantiene dentro de los límites determinados para el estudio del comportamiento de la misma y generalmente se mantuvo durante el período de análisis, cerca del promedio calculado manifestando a su vez pocos cambios bruscos, por lo que de cierta manera es poco influyente el aumento del caudal debido a la presencia de lluvias.

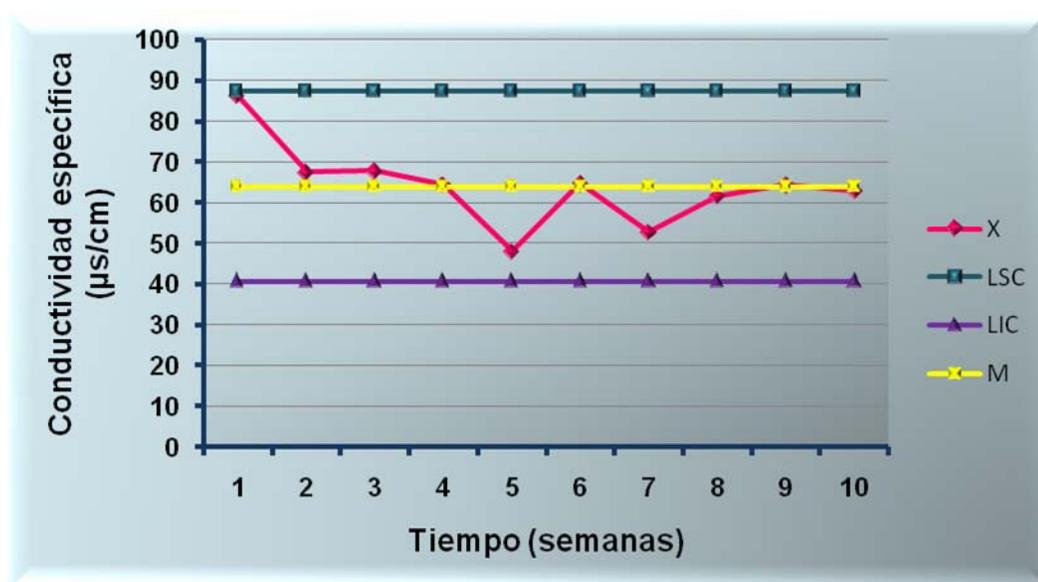


Figura 4.6. Variación de la conductividad específica del agua cruda

Estadísticamente se puede establecer que las características fisicoquímicas determinadas cumplen con los límites establecidos por el decreto 883 para las aguas de tipo 1A, siendo aproximadamente sólo el 33% de estas afectadas por el período lluvioso, durante el cual algunas de ellas en muy pocas oportunidades superan los límites establecidos. Es importante resaltar, que según informes de años anteriores, la calidad del agua cruda muy pocas veces es afectada y es poco variable durante el año independientemente de los cambios climáticos. Sin embargo, debido a la inestabilidad del clima durante la caracterización del agua, no se logró observar de manera más precisa y establecer comparaciones acerca del comportamiento de esta durante los períodos de verano e invierno.

La presencia de organismos coliformes fecales y totales es otro factor importante en la caracterización de las aguas. En las figuras 4.7 y 4.8, presentadas a continuación, se muestra como varía la presencia de estos organismos en el agua cruda durante el período de estudio notándose que esta, bacteriológicamente no está tan afectada, pues el gráfico obtenido muestra muy pocos altos indicando valores elevados de la presencia de ellos.

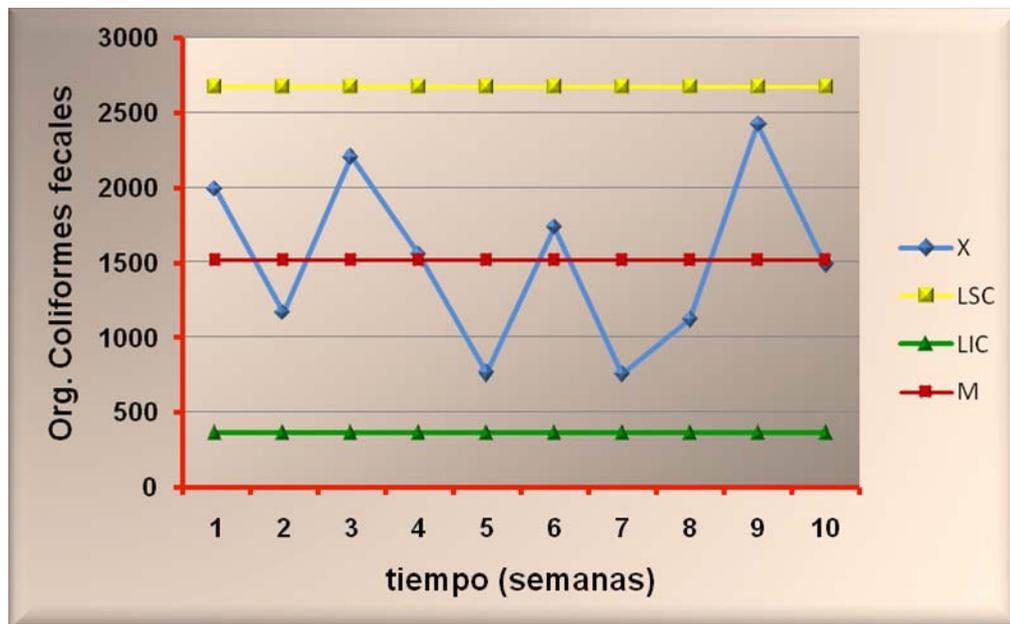


Figura 4.7. Presencia de organismos coliformes fecales en el agua cruda

El 80% de los datos graficados en la figura 4.7, indican que la presencia de organismos coliformes fecales en el agua cruda generalmente varía entre 500 y 2000, sin embargo, considerando la figura 4.8, puede observarse que la adición de otros organismos eleva alrededor de 25% la presencia de coliformes totales en el agua. Estas cifras no son tan elevadas y el 75% de los datos representados en la figura 4.8 determina que bacteriológicamente el agua procedente del río Cancamure cumple con los límites establecidos para las aguas de tipo 1A.

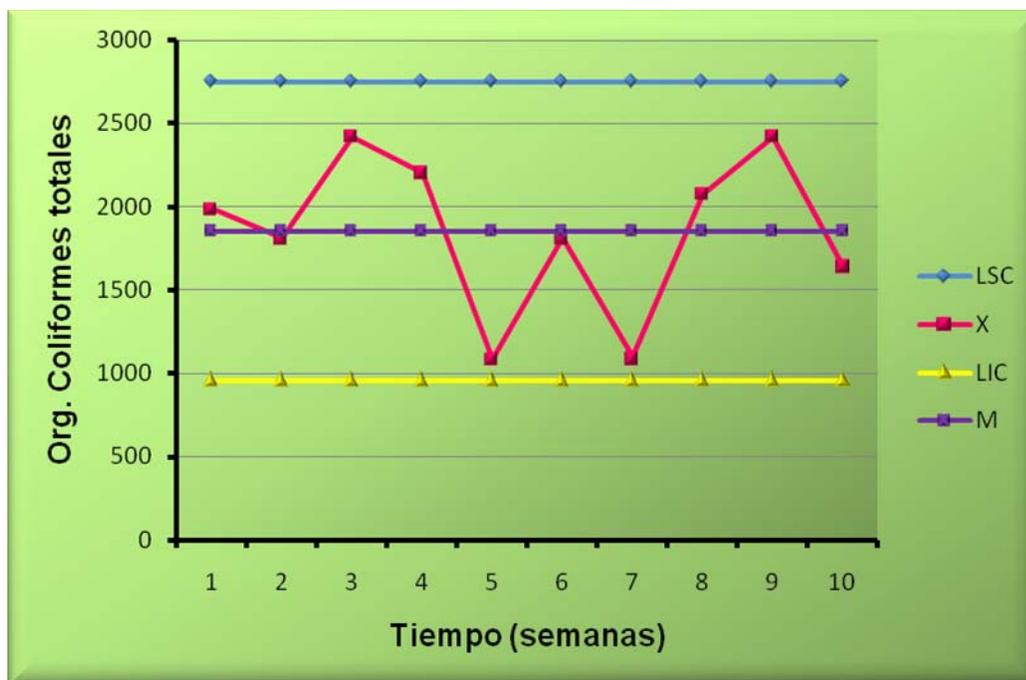


Figura 4.8. Presencia de organismos coliformestotales en el agua cruda

Es importante resaltar, que los resultados obtenidos que se encuentran por encima de los límites establecidos por la norma, se deben no sólo al arrastre ocasionado por la presencia de lluvias en las semanas durante las cuales se tomaron las muestras correspondientes a los mismos, sino también a la contaminación diaria que ofrecen quienes habitan aguas arriba de la captación y quienes visitan el río de manera esporádica, pues se debe señalar que el río Cancamure es utilizado como balneario y representa uno de los más importantes sitios turísticos del estado Sucre.

4.2. Determinación de los gradientes de velocidad y tiempos de retención de las unidades de mezcla rápida y mezcla lenta

A continuación se muestra la tabla 4.3, que presenta los gradientes de velocidad y tiempos de retención de las unidades de coagulación y floculación que forman parte del sistema de tratamiento de agua de la planta Juan José Codallos, calculados para los caudales más frecuentes de operación de la misma. Dichos gradientes son hidráulicos, pues debe recordarse que el problema de la planta antes mencionada esta basado en el funcionamiento de estas unidades.

Puede observarse que el gradiente de velocidad aumenta al aumentar el caudal, sin embargo, cuando esto ocurre disminuye el tiempo de retención de las unidades de coagulación y floculación. Es evidente que el gradiente de velocidad en estas unidades es totalmente dependiente del caudal de operación de ellas, debido a que cuando este último aumenta se genera mayor turbulencia y por ende una mayor disipación de energía dentro de las unidades mencionadas.

Además se observa que el porcentaje de desviación promedio de los gradientes de velocidad calculados para la unidad de coagulación es de 95 % aproximadamente, determinándose que el comportamiento hidráulico de esta, sólo permite obtener una eficiencia de 5%, la cual depende del caudal de operación, ya que a mayor caudal se genera mayor turbulencia y por ende mayor gradiente de velocidad, logrando así la agitación necesaria para desestabilización de las partículas y formación de flóculos.

Sin embargo para las unidades de floculación el porcentaje de desviación del gradiente calculado, para el caudal máximo de operación de la planta es de 31,8 % lo que significa que estas unidades son más eficientes que la unidad de coagulación, lo que significa que el movimiento del fluido en ellas si permite en cierto grado la formación de flóculos. Cabe destacar que las unidades de coagulación de tipo hidráulico requieren de un gradiente mínimo de 1000 s^{-1} y en la unidad de coagulación de la planta Juan José Codallos se genera un gradiente máximo de $58,53 \text{ s}^{-1}$.

Tabla 4.3. Porcentajes de desviación de los gradientes de velocidad y tiempos de retención de las unidades de coagulación y floculación

	MEZCLA RÁPIDA				MEZCLA LENTA			
	Gradiente de velocidad				Gradiente de velocidad			
caudal (l/s)	S ⁻¹	% Desv	Tr (min)	% Desv	S ⁻¹	% Desv	Tr (min)	% Desv
400	37,45	93,30	1,06	6	9,42	5,8	24,05	4
410	38,87	96,11	1,04	4,29	9,78	2,2	23,46	6
420	45,06	95,49	0,93	6,02	10,14	1,4	22,90	8,4
430	46,68	95,33	0,91	8,20	10,50	5,1	22,36	10,5
450	49,97	95,00	0,87	12,28	11,25	12,5	21,36	14,5
470	53,34	94,66	0,83	16,01	12,01	20,1	20,44	18,2
500	58,53	94,14	0,78	21,05	13,18	31,8	19,20	23,1

Con respecto a la unidad de coagulación, se determinó que el gradiente generado en la unidad es bajo, aún al caudal máximo de operación de la planta lo que significa que no se genera la turbulencia necesaria para alcanzar la máxima formación de coágulos en el tiempo requerido, pues el tiempo de retención es mayor cuando el caudal es mínimo, lo que implica que las sustancias químicas aplicadas al agua en esta unidad no actúan durante el tiempo necesario para la desestabilización de las partículas.

Para las unidades de coagulación diseñadas para operar mecánicamente, teóricamente se establece que el gradiente de velocidad debe ser mínimo de 3000 s^{-1} y un tiempo de retención de un minuto, y para las unidades de floculación el gradiente mínimo establecido es de 1000 s^{-1} y un tiempo de retención de 25 minutos, observándose los resultados obtenidos se puede decir que las unidades operan fuera de las condiciones de

diseño y por ende no logran alcanzar los niveles más altos en cuanto a formación de coágulos y flóculos.

Es importante recordar que en la planta Juan José Codallos la turbulencia y el gradiente generado en estas unidades es un trabajo realizado sólo por el fluido debido a que los equipos de agitación mecánica que estas poseen no funcionan, por lo que no se genera la energía suficiente para alcanzar los gradientes de velocidad requeridos por el proceso.

No obstante, de acuerdo a lo observado en la tabla 4.3, las unidades de floculación si cumplen con los parámetros de diseño establecidos para unidades hidráulicas, en las cuales debe generarse un gradiente mínimo de 10 s^{-1} . Las desviaciones obtenidas están justificadas por el diseño de cada unidad, ya que estas operan hidráulicamente cuando en realidad fueron diseñadas para funcionar con unidades adicionales de agitación. Además, los porcentajes de desviación con respecto al tiempo de retención de las unidades son bajos a pesar de las condiciones operativas de ellas, por lo que se puede decir que estos parámetros para las unidades de floculación cumplen con lo establecido en el diseño de floculadores hidráulicos.

4.3. Determinación de la dosis de coagulante requerida considerando el gradiente de velocidad hidráulico real de la planta.

Antes de determinar la dosis de coagulante, se verificó que los gradientes de velocidad y tiempos de retención calculados para las unidades de coagulación y floculación correspondían al comportamiento real de la planta, mediante la realización de pruebas de jarra a diferentes caudales de operación. Estas pruebas son mostradas en el anexo I.

4.3.1. Verificación del gradiente de velocidad

De acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas, se pudo determinar que los gradientes calculados corresponden a los gradientes reales de la planta, pues al aplicar la dosis de coagulante aplicada en planta en el momento de realizar las pruebas, se obtuvo gran similitud del agua clarificada proveniente de los sedimentadores y del agua clarificada

obtenida en el ensayo. Aproximadamente el 80% de las pruebas realizadas demuestra que los resultados obtenidos en cuanto a turbidez, color y pH del agua clarificada se desvía sólo en un 5% de las características del agua clarificada en planta.

Las desviaciones de los resultados obtenidos en los ensayos se deben a que el equipo utilizado para realizar las pruebas genera en la jarra una agitación que permite un mezclado casi perfecto y que evidentemente no existe en planta, pues en el equipo de pruebas la turbulencia del fluido es inducida por las paletas sin embargo en la planta es generada sólo por las deformaciones del fluido dentro de las unidades.

Otro factor que afecta los resultados es la dosificación de coagulantes en planta, pues los equipos para la aplicación de sulfato de aluminio se encuentran un poco deteriorados, por lo no se realiza este proceso de manera exacta, dosificándose en muchas ocasiones más de las cantidades requeridas de sulfato de aluminio, lo que produce enturbiamiento del agua proveniente de los sedimentadores.

4.3.2. Dosis de coagulante requerida para cumplir con el proceso de potabilización

Una vez verificado los gradientes se realizaron pruebas de jarra a fin de encontrar una dosis de coagulante para diferentes unidades de turbidez del agua cruda. Los resultados de estas pruebas de jarra se muestran en la tabla 4.4, en la cual se puede observar que las dosis de coagulante necesarias para alcanzar la clarificación del agua no son tan elevadas, ni siquiera en los casos donde la turbidez supera los límites establecidos por la norma, esto debido a que la calidad del agua cruda es muy buena.

En función a los resultados obtenidos, mostrados en la tabla antes mencionada, se puede decir que no siempre es indispensable la dosificación de coagulantes para obtener agua potable que cumpla con los parámetros de calidad establecidos en la gaceta oficial de la república de Venezuela N° 36.395, publicada el 13 de febrero de 1998, mostrada en el anexo B. Debido a que la turbidez del agua generalmente es muy baja, al igual que el color, no se logró determinar dosis de coagulantes para turbidez alta y media, porque aun cuando

estas pruebas fueron realizadas durante período lluvioso, los valores de estas características del agua de entrada a la planta eran muy bajos.

Tabla 4.4. Dosis de coagulante a diferentes unidades de turbidez, color y pH del agua

Caudal (l/s)	Turbidez (NTU)	Color (UC)	pH	Dosis de coagulante (ppm)
430	11,0	10,0	7,4	4,0
	5,0	10,0	7,6	4,0
450	5,0	8,0	7,1	1,5
	6,8	5,0	7,6	7,0
	4,6	5,0	7,4	5,0
	37,0	30,0	6,5	15,0
	8,5	20,0	7,7	10,0
470	5,8	5,0	7,6	7,0
	15,7	12,0	7,8	8,0
	4,1	4,0	7,8	3,0
	61,9	120	7,5	12,0
	8,7	12,0	8,0	12,0
	9,1	7,0	7,8	6,0

4.4. Determinación de la eficiencia de las diferentes unidades operativas del sistema de potabilización.

Es evidente que las unidades que conforman el sistema de tratamiento de agua de la planta Juan José Codallos no es 100 % eficiente, es por ello que se realizaron una serie de cálculos y análisis a fin de demostrar cuan eficiente es cada una de las unidades estudiadas. A continuación se presentan los resultados obtenidos por cada unidad estudiada.

4.4.1. Desarenador

Para determinar la eficiencia de esta unidad, se calculó el tiempo de retención de la misma, obteniéndose para ello un valor de 4,23 minutos, siendo según la bibliografía citada, el tiempo de retención máximo de diseño de estas unidades igual a 3 minutos (Arrieta, 2000) lo que significa que el tiempo de retención real de la unidad se desvía en un 40% aproximadamente de dicho valor, esto puede ocurrir debido a que el caudal de operación de esta es relativamente bajo para el dimensionamiento de ella.

De igual manera se determinó cuán eficiente es la unidad con respecto a la remoción de turbidez, cuyos resultados se representan gráficamente en la figura 4.9, en la cual puede observarse que el 26 % de los datos tomados demuestran que en cuanto a remoción de turbidez el desarenador de la planta Juan José Codallos es 50 % eficiente, lo que significa que esta unidad también presenta deficiencias en cuanto a su capacidad de remover turbidez del agua se refiere.

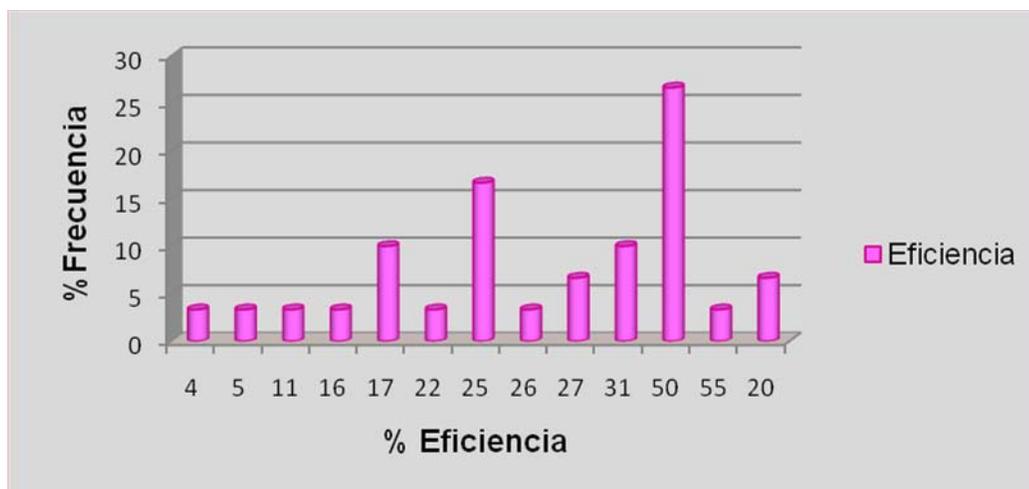


Figura 4.9. Eficiencia del desarenador con respecto a la remoción de turbidez

4.4.2. Sedimentadores

Para las unidades de sedimentación se obtuvo un tiempo de retención igual a 2,3 horas para cada una de ellas, cuyo valor al ser comparado con el establecido por el diseño, el cual es de máximo dos horas (Vargas, 2004), determina que este sólo se desvía en un

15% del valor teórico. No obstante, se debe resaltar que dicho valor puede no ser el valor exacto del tiempo de retención de las unidades, ya que fue calculado asumiendo que el caudal de alimentación de la planta se distribuía uniformemente para los tres sedimentadores de la planta, esto debido a que no se dispuso de un equipo de medición que permitiera la determinación del caudal en ellos.

El porcentaje de remoción de turbidez alcanzado por estas unidades también fue determinado, y se representan gráficamente en las figuras 4.10, 4.11 y 4.12 para los sedimentadores 1, 2 y 3 respectivamente. Puede observarse que de acuerdo con los porcentajes de frecuencia calculados entre el 15 y el 20 % de los datos tomados de turbidez de entrada y salida demuestran que la eficiencia de estas unidades está entre 40 y 50 %. A continuación se muestran las figuras antes mencionadas.

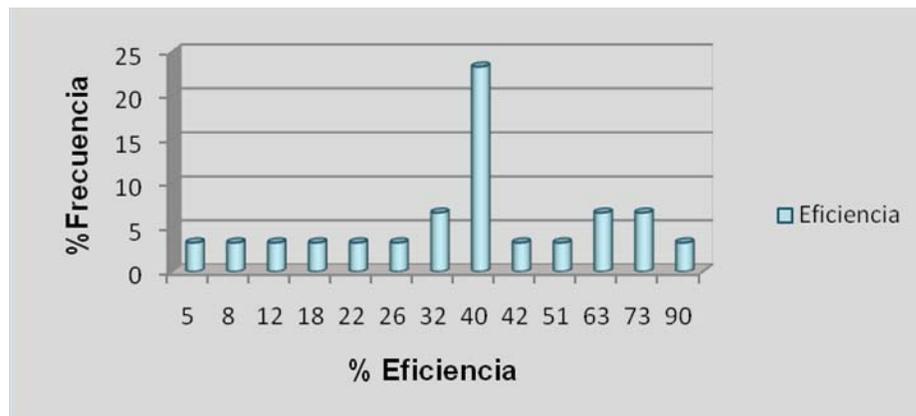


Figura 4.10. Eficiencia con respecto a la remoción de turbidez del sedimentador N° 1 de la planta Juan José Codallos

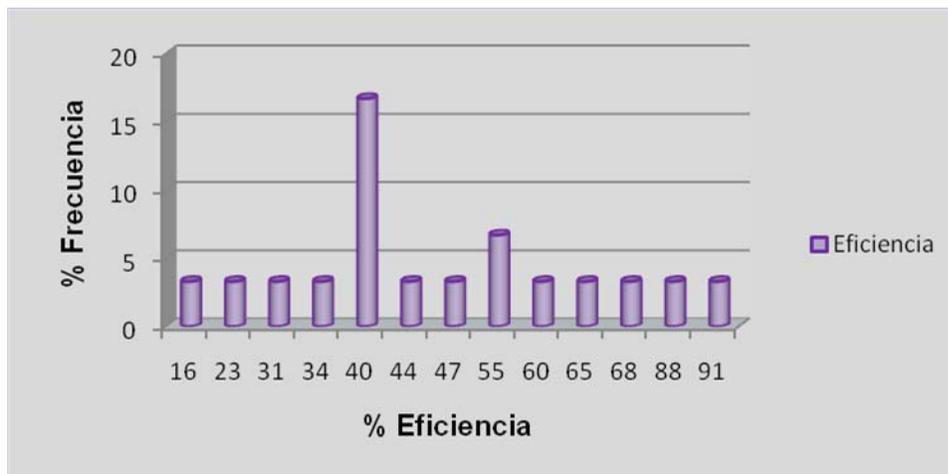


Figura 4.11. Eficiencia con respecto a la remoción de turbidez del sedimentador N° 2 de la planta Juan José Codallos

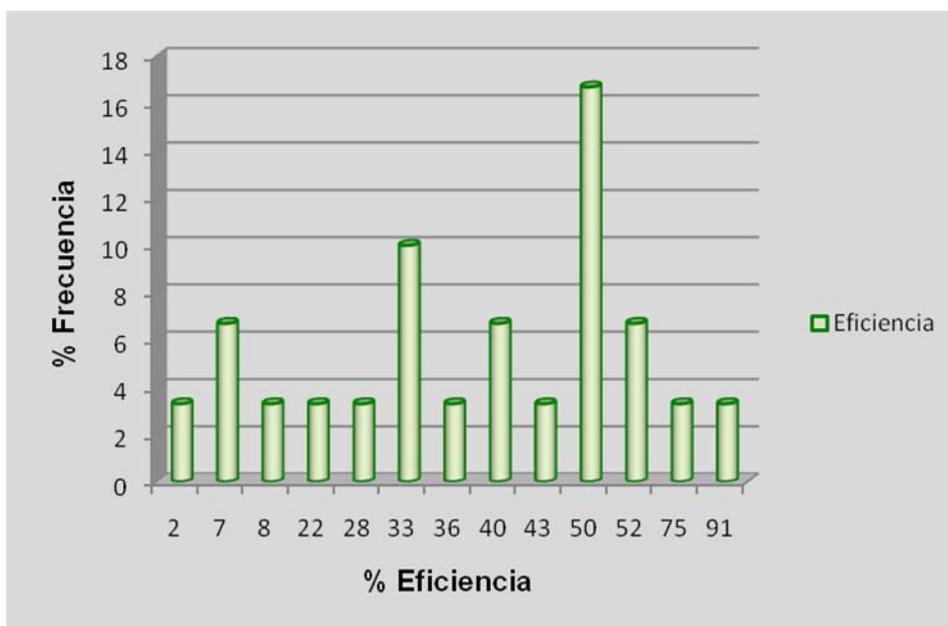


Figura 4.12. Eficiencia con respecto a la remoción de turbidez del sedimentador 3 de la planta Juan José Codallos

Durante el período de evaluación del sistema de tratamiento de agua de la planta, se pudo observar que en muchas ocasiones el sulfato aplicado para disminuir la turbidez del agua tiende a aumentarla, esto ocurre debido a que el sulfato de aluminio dosificado no

cumple del todo su función debido a las deficiencias que presentan las unidades previas a los sedimentadores (coagulador y floculadores).

4.4.3. Filtros

La determinación de eficiencia mediante el cálculo de remoción de turbidez, también fue aplicada para evaluar unidades de filtración de la planta Juan José Codallos, las cuales no pudieron ser evaluadas individualmente debido a que el caudal era insuficiente para alcanzar las tuberías de tomas de muestras de cada filtro, impidiendo así la salida de agua. Sin embargo tomando en cuenta el agua filtrada tomada a la salida de las unidades (entrada al tanque de almacenamiento) se determinó que tan eficientes son estas unidades en cuanto a la remoción de turbidez del agua, los resultados obtenidos se muestran a continuación en la figura 4.13.

El análisis estadístico aplicado demuestra que las unidades de filtración presentan actualmente un 50% de eficiencia, tal como se muestra en la figura anterior. La eficiencia de estas unidades es afectada por distintos factores, entre ellos el deterioro del lecho filtrante, el cual tiene aproximadamente 15 años sin ser reemplazado y tiende a romperse en muchos casos durante el proceso de filtrado, cuyos sólidos desprendidos enturbian el agua.

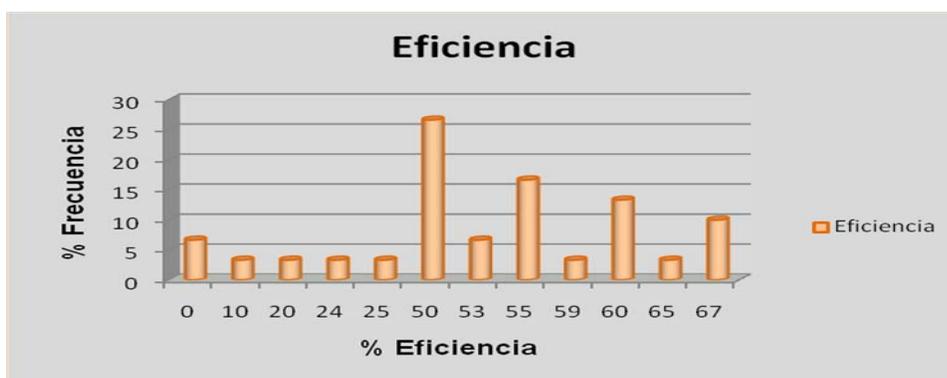


Figura 4.13. Eficiencia con respecto a la remoción de turbidez de las unidades de filtración de la planta Juan José Codallos

A pesar de las deficiencias que presenta el sistema de tratamiento de agua de la planta Juan José Codallos, el agua potable obtenida y la cual es distribuida con el objeto de abastecer la ciudad de Cumaná, desde el punto de vista fisicoquímico y organoléptico, cumple con la normativa sanitaria de calidad de agua potable establecida en la gaceta oficial N° 36.395. Los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados al agua filtrada se presentan en la tabla G-4 del anexo G, en la cual puede observarse que el agua no excede los límites de las características fisicoquímicas establecidas por la norma antes mencionada, presentada en el anexo A.

CONCLUSIONES

1. De acuerdo al punto donde se captaron las muestras de agua cruda, el agua proveniente del río Cancamure utilizada como fuente de abastecimiento de la planta de potabilización evaluada, en los parámetros de pH, color, turbidez, alcalinidad, conductividad específica, sólidos disueltos totales y organismos coliformes totales, cumple con la normativa de calidad establecida por el decreto 883 para las aguas de tipo 1A.
2. Las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua cruda son mínimamente alteradas durante el período lluvioso.
3. Los gradientes de velocidad de las unidades de coagulación y floculación de la planta Juan José Codallos se encuentran por debajo de los límites establecidos por el diseño para unidades de coagulación y floculación hidráulicas. Para el caudal más frecuente de operación de la planta (470 l/s) son iguales a $53,34 \text{ s}^{-1}$ y $20,1 \text{ s}^{-1}$ respectivamente.
4. El tiempo de retención de las unidades de coagulación y floculación se desvía en un porcentaje menor del 25% de los valores establecidos por el diseño para ambas unidades.
5. El 80% de las pruebas de jarras realizadas para verificar los gradientes de velocidad calculados, demuestran que estos corresponden a los gradientes reales de la planta.
6. Debido a la calidad del agua cruda tratada no se requieren de dosis elevadas de productos químicos para cumplir con el proceso de potabilización, y en muchos casos no se requiere dosificación de coagulantes.
7. El tiempo de retención del desarenador es de 4,33 minutos, desviándose este valor en un 40% del tiempo de retención de diseño de estas unidades. El 26 % de los datos

tomados para determinar el porcentaje de remoción turbidez de esta unidad demuestran dicha unidad es aproximadamente 50 % eficiente.

8. La eficiencia de las unidades de sedimentación varía entre 40% y 50%, y se requiere mejorar el control en cuanto a la dosificación de coagulantes, debido a que en muchos casos estos tienden a enturbiar el agua.
9. Más del 25% de los datos tomados de turbidez del agua de entrada y salida de las unidades de filtración demuestran que dichas unidades son 50% eficientes. El deterioro del lecho filtrante afecta la eficiencia de los filtros, impidiendo en ciertas ocasiones obtener los límites de turbidez y color deseados.
10. A pesar de las deficiencias que presenta el sistema de tratamiento de agua de la planta Juan José Codallos el agua potable distribuida a la ciudad de Cumaná cumple con la normativa sanitaria de calidad de agua potable establecida en la gaceta oficial N° 36.395.

RECOMENDACIONES

1. La empresa debe realizar las actividades necesarias que permitan resguardar la zona donde se ubica la captación de agua cruda, con el objeto de evitar la posible contaminación de esta en el futuro.
2. Evaluar la reubicación del punto de dosificación de coagulantes, con el objeto de encontrar un punto donde se genere mayor turbulencia y la formación de coágulos pueda ser más efectiva.
3. Tomar en cuenta el caudal real de operación de la planta, determinado por el caudalímetro ubicado a la entrada de ella, para realizar la dosificación de coagulantes.
4. Considerar los gradientes reales de velocidad al momento de realizar pruebas de jarra para determinar dosis de coagulante a una calidad específica del agua, a fin de obtenerla mejor dosis posible evitando exceder la cantidad de coagulante utilizada en planta.
5. Evitar la dosificación de coagulante cuando no sea necesario, pues en las condiciones que se encuentran las unidades de coagulación y floculación de la planta el sulfato en ciertas ocasiones enturbia el agua.
6. Realizar mantenimiento periódico de las unidades de dosificación de sulfato.
7. Cambiar el lecho de las unidades de filtración.
8. Tratar de ser más precisos al momento de dosificar productos químicos en planta a fin de evitar exceder la cantidad de coagulante necesaria.

9. Reemplazar los equipos de agitación mecánica que poseen las unidades de coagulación y floculación.
10. Reparar las fugas de agua que actualmente hay en la planta, evitando así disminuir la producción.
11. Considerar la evaluación del agua de lavado de los filtros con el objeto de determinar su reutilización y poder aumentar la producción.

BIBLIOGRAFÍA

APHA-AWWA-WPCF.(1980). **Métodos normalizados para el análisis de agua potable y residual.** (Décima quinta edición). USA.

ACODAL, HIDROCAPITAL., (1993). Control de calidad de agua para consumo humano. Asociación colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Acodal- Valle del Cauca. Colombia.

Aurazo, M., (2004). **Aspectos biológicos de la calidad del agua. Plantas de filtración rápida.** Manual I: Teoría. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencia del Ambiente CEPIS/OPS (Vol. 1) Lima.

Arboleda, J. (2000). **Teoría y práctica de la purificación del agua.** Tomo I. (Tercera ed.).Colombia. McGRAW-HILL.

Arboleda, J. (2000). **Teoría y práctica de la purificación del agua.** Tomo II. (Tercera ed.).Colombia. McGRAW-HILL.

Arrieta (2000). **Manual de operación y mantenimiento de sistemas de potabilización.**

Barrenechea, A. (2004).**Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. Plantas de filtración rápida.** Manual I: Teoría. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencia del Ambiente CEPIS/OPS (Vol. 1) Lima.

Carpio, R., Ramírez, M., (2008). **Evaluación del tratamiento químico para el aumento de la capacidad en la planta potabilizadora Santa Clara.** Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, Barcelona, Venezuela.

Castillo, N., (2004). **Evaluación de la planta de tratamiento de agua potable del municipio Valle San Juan (Tolima)**. Trabajo de Grado, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Química, Manizales. Disponible en URL: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1080/1/nidiavictoriacastillogonzalez.2004.pdf>. [Consulta 20 de mayo de 2011].

CEPIS, (2002). **Filtración rápida**. Manual III: Teoría. Programa regional HPE/OPS/CEPIS para el mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano. Lima, Perú.

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

Departamento de sanidad del estado de Nueva York., (1991). **Manual de tratamiento de aguas**. Editorial LIMUSA.

ENOSHA., (2007). **Floculación**. Disponible en URL http://www.frbb.utn.edu.ar/carreras/materias/ing_sanitaria/ENOSHsa%20Floculacion.

Gaceta oficial de la República de Venezuela N° 5021, decreto N° 883., (1995). **Normas para la clasificación y control de calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos**. Caracas.

Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 36.395. (1998). **“Normas sanitarias de calidad del agua potable”**. Caracas.

Gómez, N., (2002). **Evaluación del sistema de tratamiento de agua potable del campamento Macagua- Central Hidroeléctrica “23 de enero”**. Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, Barcelona, Venezuela.

Hernández, A., (2007). **Evaluación del sistema de tratamiento de agua potable y de aguas para calderas a ser utilizadas en una planta pasteurizadora.** Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, Barcelona, Venezuela.

Maldonado, V.,(2004).**Sedimentación. Plantas de filtración rápida.** Manual I: Teoría. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencia del Ambiente CEPIS/OPS (Vol. 1) Lima.

Molinero, M., (2003). **Control de Calidad.** Disponible en URL <http://www.seh-lilha.org/calidad.htm>.

Najul, Blanco y Alberdi(2005).**Manual de tratamiento para potabilización de aguas.**

HIDROVEN. (2004). **Protocolo de los procedimientos de operación estándar para análisis de aguas.**

Perry, R., Green, D., (2001). **Manual del ingeniero químico.** Volumen III. Séptima Edición, Editorial McGraw- Hill, México.

Pino, M (2003). **Evaluación de la dosificación de coagulantes y su influencia en las operaciones de coagulación y filtración en las plantas de potabilización.** Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, Barcelona, Venezuela.

Ríos, D., (2005). **Utilización del parámetro eficiencia en remoción de turbiedad en sedimentadores.** Uruguay.

Ven Te Chow, (2004). **Hidráulica de Canales Abiertos.** Editorial McGraw- Hill. Bogotá, Colombia.

Vargas, L (2004). **Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida.** Manual I: Teoría. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencia del Ambiente CEPIS/OPS (Vol. 1) Lima.

Wikipedia Foundation, (2011). **Estadística Descriptiva.** Disponible en URL http://es.wikipedia.org/wiki/Estad%C3%ADstica_descriptiva.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

TÍTULO	EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA DE UNA PLANTA POTABILIZADORA EN LA CIUDAD DE CUMANÁ ESTADO SUCRE
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Marval S. Claribel del V.	CVLAC: V-17.910.169 E MAIL: clarisim@hotmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Tratamiento de Agua

Agua Potable

Planta Potabilizadora

Coagulación y Floculación

Desarenador

Formación de Flóculos

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Química

RESUMEN (ABSTRACT):

El trabajo tuvo como finalidad evaluar el sistema de tratamiento de agua de la planta potabilizadora Juan José Codallos, realizándose, el análisis de la fuente de abastecimiento de agua cruda de la misma, pudiendo ser este tipo de aguas tratadas sólo con proceso de desinfección. Se determinaron los gradiente de velocidad (velocidad de agitación del fluido) y tiempos de retención de las unidades de coagulación y floculación que forman parte del sistema de potabilización de la planta, lo que indica que la unidad de coagulación presenta muchas deficiencias, impidiendo la desestabilización de las partículas sólidas suspendidas en el agua, mientras que en la unidad de floculación el movimiento del fluido es suficiente para promover la formación de flóculos. Además se realizaron pruebas de jarras para determinar la dosis de coagulante necesario para lograr el proceso de potabilización, cuyos resultados demuestran que debido a la calidad del agua, no se requieren dosis elevadas de coagulante. Se determinó la eficiencia de las unidades operativas del sistema de potabilización, y estadísticamente se demostró que para el desarenador, sedimentadores y filtros de la planta, esta oscila entre 40% y 50 %, indicando que el sistema de potabilización en general presenta deficiencias.

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

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
Amundarain, Milena			X		
	CVLAC:	V-3.945.689			
	E_MAIL	milena.amundarain@gmail.com			
	E_MAIL				
Brito, Cruzmila				X	
	CVLAC:	V-15.318.792			
	E_MAIL	cruzmilabrito@gmail.com			
	E_MAIL				
Cova, Alexis					X
	CVLAC:	V-11.905.328			
	E_MAIL	ajcova@udo.edu.ve			
	E_MAIL	alexiscovab@gmail.com			
Salas, Yraima					X
	CVLAC:	V-8.478.649			
	E_MAIL	yrasal57@hotmail.com			
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2011 AÑO	11 MES	24 DÍA
-------------	-----------	-----------

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**ARCHIVO (S):**

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
Tesis Sistema de agua.doc	Aplicación/msword

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

ALCANCE

ESPACIAL: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Químico _____

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pre-Grado _____

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

Claribel Marval

Autor

Milena Amundarain

Asesor

Cruzmila Brito

Tutor

Alexis Cova

Jurado

Yraima Salas

Jurado

Yraima Salas

Por la subcomisión de tesis