

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **POSIBILIDADES DE MEJORAMIENTO DE UNA PLANTA POTABILIZADORA NO CONVENCIONAL**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por las Brs. Mariela del C. Chourio A.  
María J. Cabrera C.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Químico

Caracas, Mayo de 2012

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **POSIBILIDADES DE MEJORAMIENTO DE UNA PLANTA POTABILIZADORA NO CONVENCIONAL**

TUTORES ACADEMICOS: Ing. Henry Blanco

Ing. María Virginia Najul

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Agustín Macías

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por las Brs. Mariela del C. Chourio A.  
María J. Cabrera C.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Químico

Caracas, Mayo de 2012

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por las Bachilleres Mariela del C. Chourio A. y María J. Cabrera C, titulado:

**“POSIBILIDADES DE MEJORAMIENTO DE UNA PLANTA POTABILIZADORA NO CONVENCIONAL”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.

Prof. Rebeca Sanchez  
Jurado

Prof. Anubis Pérez  
Jurado

Prof. Henry Blanco  
Tutor Académico

Prof. María V. Najul  
Tutor Académico

Ing. Agustín Macías  
Tutor Industrial

## AGRADECIMIENTOS

Ante todo agradecemos a Dios Todopoderoso, sin su ayuda nada es posible.

A la Universidad Central de Venezuela por abrirnos sus puertas y proporcionarnos una enseñanza de calidad permitiéndonos llegar a ser profesionales.

A nuestros tutores, María Najul y Henry Blanco por su asesoría y orientación, su constante dedicación, sus consejos y su gran paciencia.

Al Ing. Agustín Macías y la Ing. Lifred Urbina por su continua preocupación en proporcionar el material y las herramientas necesarias para llevar a cabo cada una de las pruebas y ensayos necesarios para la realización de este trabajo especial de grado.

A nuestros familiares y amigos, por amarnos y empujarnos hacia la meta a pesar de las adversidades. Ellos son el mejor ejemplo de constancia, perseverancia y hermandad, nos acompañaron en esta lucha y nos enseñaron que no hay nada imposible.

Al personal que labora en la planta de Pie de Cerro por su valiosa colaboración y apoyo, durante nuestra estadía en la planta de tratamiento.

Agradecemos la ayuda financiera proporcionada por la empresa HIDROCENTRO, C.A.

Y, sobre todo agradecemos, a nuestros excelentes padres que nos han acompañado y guiado desde el primer día de nuestras vidas.

Cabrera C. María J., Chourio A. Mariela del C.

## POSIBILIDADES DE MEJORAMIENTO DE UNA PLANTA POTABILIZADORA NO CONVENCIONAL

**Tutor Académico: Ing. Henry Blanco; Ing. María Virginia Najul. Tesis.  
Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. 2012.  
Nº Pág. 124.**

**Palabras clave:** Planta potabilizadora, comportamiento hidráulico, consumo de sustancias químicas.

**Resumen.** Proporcionar agua de calidad a la población es la preocupación de todas las empresas potabilizadoras de agua. Es por esto que, el presente trabajo especial de grado tiene como objetivo evaluar el funcionamiento de la planta potabilizadora Pie de Cerro para ajustar prácticas de operación que conduzcan a un mejoramiento a corto plazo. Inicialmente se realizó la revisión de cada una de las unidades que conforman la planta, para describirlas detalladamente y determinar los parámetros principales de operación. Se analizaron datos existentes de calidad del agua cruda y tratada (2008-2010) para conocer sus características. Se realizaron ensayos de trazadores para determinar el comportamiento hidráulico de las unidades de mezcla y sedimentación, así como la determinación de la dosis óptima de sustancias químicas realizando una simulación del proceso real a escala de laboratorio con ensayos de jarros. Los resultados obtenidos se compararon con lo recomendado en la literatura y con la ficha técnica de la planta, lo que sirvió de apoyo para definir las mejoras, clasificadas según su factibilidad técnica y económica, en mejoras de tipo operacional y estructural a corto, mediano y largo plazo, algunas de las cuales fueron llevadas a cabo durante la ejecución del presente trabajo.

De las observaciones y pruebas realizadas se comprobó que las características del agua cruda presentan una variabilidad estacional que obedece a las condiciones climatológicas. El comportamiento hidráulico de los desarenadores tienden a flujo pistón y en la unidad de mezcla rápida, la combinación de efecto tubería-cilindro provee una mezcla adecuada del coagulante. Con base en el análisis de los parámetros de diseño y del comportamiento hidráulico del sedimentador, el caudal de diseño de 150 l/s sobrepasa la capacidad de la unidad, , siendo el caudal más frecuente de operación (120 l/s), el más adecuado para que el proceso se dé de manera eficiente, demostrándose nuevamente la inconveniencia de usar unidades sedimentadoras de sección cuadrada. La instalación del equipo de dosificación y el cambio del punto de inyección ubicándolo en la tubería de aproximación a la planta, produjo un ahorro del 16% de coagulante, mientras que los ensayos de demanda de cloro realizados evidenciaron un excesivo consumo de cloro en el orden del 97%. De manera general, la falta de mantenimiento preventivo generó problemas estructurales, tales como deterioro de las unidades y equipos lo cual contribuye a una operación deficiente.

Se plantearon como mejoras a corto plazo, la colocación de un caudalímetro a la entrada de la planta, realizar periódicamente ensayos de pruebas de jarros y demanda de cloro y efectuar mantenimiento preventivo de cada una de las unidades y equipos existentes. En las mejoras a mediano plazo, colocación de un controlador de flujo del agua de lavado de los filtros y reparación de compuerta de paso de agua a la unidad de filtración y por último como mejora a largo plazo, rediseñar el desarenador del río Gabante.

## INDICE DE CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	Vii
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	Xi
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO I</b> .....	2
<b>FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	2
1.1 Planteamiento del Problema.....	2
1.2 Descripción de Antecedentes.....	3
1.3.- Objetivos.....	7
1.3.1.- Objetivo General.....	7
1.3.2.- Objetivos Específicos.....	7
<b>CAPÍTULO II</b> .....	8
<b>MARCO REFERENCIAL</b> .....	8
Plantas modulares no convencionales.....	8
Tratamiento preliminar.....	9
Coagulación-floculación.....	11
Sedimentación.....	14
Filtración.....	17
Desinfección.....	18
Punto de aplicación del cloro.....	20
<b>CAPÍTULO III</b> .....	21
<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	21
1. Comparación del funcionamiento actual de las unidades que conforman la planta con lo establecido en la literatura y/o ficha técnica.....	21

1.1 Descripción de la planta pie de cerro.....	21
1.2 Revisión y análisis de caudal y parámetros de calidad del agua.....	22
1.3 Determinación de los parámetros de diseño y su desviación con respecto a los valores obtenidos a partir del caudal de operación actual...	22
1.4 Determinación del comportamiento hidráulico de las unidades.....	23
1.5 Observación de las prácticas operacionales.....	24
2. Proposición de cambios en la operación de la planta que incidan en el mejoramiento.....	25
2.1 Determinación de los parámetros operacionales.....	25
2.2 Factibilidad de aplicación de medidas para la mejoras.....	29
3. Presentación de los cambios en la operación ejecutados que contribuyeron a una mejora en el proceso.....	30
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>31</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>31</b>
1.1 Descripción de la planta pie de cerro.....	31
1.2 Revisión y análisis de caudal y parámetros de calidad del agua.....	40
1.3 Determinación de los parámetros de diseño y su desviación con respecto a los valores obtenidos a partir del caudal de operación actual.....	52
1.4 Determinación del comportamiento hidráulico de las unidades.....	58
1.5 Observación de las prácticas operacionales.....	67
2.1 Determinación de los parámetros operacionales.....	69
2.2 Factibilidad de aplicación de medidas para la mejoras.....	83
3. Presentación de los cambios en la operación ejecutados que contribuyeron a una mejora en el proceso.....	88
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>89</b>

<b>RECOMENDACIONES</b> .....	89
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	92
<b>APÉNDICES</b> .....	94
APÉNDICE A. Ficha técnica de la planta de tratamiento de Pie de Cerro. Septiembre 2011.....	96
APÉNDICE B. Precipitación acumulada en el año 2010 con respecto a la media acumulada en el estado Aragua.....	96
APÉNDICE C. Tablas y Curvas de calibración del ensayo de trazadores.....	100
APÉNDICE D. Prueba de jarros ajustada para simular el proceso de mezcla rápida, mezcla lenta y sedimentación de la planta de tratamiento. <i>Planta Potabilizadora Pie de Cerro – HIDROCENTRO</i> .....	101
APÉNDICE E. Resultados de la granulometría del material filtrante proveniente de la planta de tratamiento de Pie de Cerro.....	104
APÉNDICE F. Tablas de dosificación de cloro en la pre y pos cloración durante el mes de agosto de 2011.....	110
APÉNDICE G. Cálculos tipo.....	111
APÉNDICE H. Tablas y figuras utilizadas para el cálculo de parámetros.....	113
APÉNDICE I. Estudio del comportamiento del caudal de operación.....	121

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura II.1.</b> Esquema de una planta modular .	9
<b>Figura II.2.</b> Comparador para estimar el tamaño del flóculo producido en la Coagulación (según WRA)	13
<b>Figura II.3.</b> Curva de distribución de concentración (curva C)	15
<b>Figura II.4.</b> Curva de distribución de concentración acumulada (curva F)	17
<b>Figura II.5.</b> Curva General de demanda de cloro.	20
<b>Figura II.6.</b> Equipo de prueba de jarros utilizado en la planta de tratamiento Pie de Cerro.	26
<b>Figura II.7.</b> Instrumento utilizado para medir la expansión del lecho en los filtros, P.T. de Pie de Cerro.	28
<b>Figura IV.1.</b> Esquema dimensional de los desarenadores del río Curtidor.	32
<b>Figura IV.2.</b> (a y b).Desarenadores del río Curtidor.	32
<b>Figura IV.3.</b> Esquema dimensional de la unidad compacta de la planta de tratamiento Pie de Cerro.	34
<b>Figura IV.4.</b> (a, b, c y d). Unidad compacta de la planta de tratamiento Pie de Cerro	34
<b>Figura IV.5.</b> Dosificador de sulfato de aluminio de la planta de tratamiento Pie de Cerro.	35
<b>Figura IV.6.</b> Sala de cloración de la planta de tratamiento Pie de Cerro.	35
<b>Figura IV.7.</b> Esquema dimensional de los filtros de la planta de tratamiento Pie de Cerro.	36
<b>Figura IV.8.</b> (a, b y c). Filtros de la planta de tratamiento Pie de Cerro.	37
<b>Figura IV.9.</b> Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) de la Planta de Tratamiento de agua de Pie de Cerro.	38
<b>Figura IV.11.</b> Caudal de operación de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.	40

<b>Figura IV.12.</b> Turbiedad del agua cruda de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO. .....	41
<b>Figura IV.13.</b> Color aparente del agua cruda de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.....	42
<b>Figura IV.14.</b> Valor promedio de turbiedad y color del agua cruda de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.....	43
<b>Figura IV.15.</b> pH del agua cruda de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.....	44
<b>Figura IV.16.</b> Conductividad específica del agua cruda de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.....	45
<b>Figura IV.17.</b> Turbiedad del agua potable de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO. .....	46
<b>Figura IV.18.</b> Color aparente del agua potable de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.....	47
<b>Figura IV.19.</b> pH del agua potable de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.....	48
<b>Figura IV.20</b> Conductividad específica del agua tratada de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.....	49
<b>Figura IV.21.</b> Cloro residual del agua potable de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.....	49
<b>Figura IV.22.</b> Consumo de sulfato de aluminio y turbiedad del agua cruda en función del tiempo de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.....	50
<b>Figura IV.23.</b> Filtros de la planta de tratamiento Pie de Cerro operando con mínimo caudal. ....	57
<b>Figura IV.24.</b> Curva de conductividad Vs tiempo en el desarenador del río Curtidor. .....	59
<b>Figura IV.25.</b> Curva C-t ajustada para el desarenador del río Curtidor.....	59
<b>Figura IV. 26.</b> Curva F para la unidad del desarenador del río Curtidor. ....	60
<b>Figura IV.27.</b> Curva de conductividad Vs tiempo de la unidad de mezcla lenta. ....	62
<b>Figura IV.28.</b> Curva C-t ajustada para la unidad de mezcla lenta – determinación de parámetros. ....	62

<b>Figura IV. 29.</b> Curva F para la unidad de mezcla lenta. ....	63
<b>Figura IV.30.</b> Curva de conductividad Vs tiempo en el sedimentador.....	64
<b>Figura IV.31.</b> Curva C-t ajustada para el sedimentador– Determinación de parámetros. ....	65
<b>Figura IV.32.</b> Curva F del sedimentador. ....	66
<b>Figura IV.33.</b> Turbiedad promedio del agua sedimentada en la planta de tratamiento de Pie de Cerro y en el ensayo de jarros. ....	69
<b>Figura IV.34.</b> Color promedio del agua sedimentada en la planta de tratamiento de Pie de Cerro y en el ensayo de jarros. ....	70
<b>Figura IV.35.</b> pH promedio del agua sedimentada en la planta de tratamiento de Pie de Cerro y en el ensayo de jarros.....	70
<b>Figura IV. 36.</b> ( <i>a y b</i> ) Comportamiento de la turbiedad del agua cruda, sedimentada y tratada en la planta de tratamiento de Pie de Cerro durante el día que se realizaron las pruebas 1 y 3.....	74
<b>Figura IV. 37.</b> ( <i>c y d</i> ) Comportamiento de la turbiedad del agua cruda, sedimentada y tratada en la planta de tratamiento de Pie de Cerro durante el día que se realizaron las pruebas 2 y 4.....	76
<b>Figura IV.38.</b> Duración de la operación de lavado de los filtros de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.....	79
<b>Figura IV.39.</b> Tiempo de estabilización luego del lavado de los filtros de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.....	80
<b>Figura IV.40.</b> Curva de demanda de cloro de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO (alta turbiedad).....	81
<b>Figura IV.41.</b> Curva de demanda de cloro de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO. (baja turbiedad) .....	82
<b>Figura B.1.</b> Precipitación acumulada en el año 2010 con respecto a la media acumulada en el estado Aragua. (INAMEH) .....	100
<b>Figura C.1.</b> Curva de calibración conductímetro YCI PETA (Utilizado para el desarenador del río Curtidor) .....	101

<b>Figura C.2.</b> Curva de calibración conductímetro YCI HC (Sedimentador y floculador).....	102
<b>Figura C.3.</b> Curva de calibración Conductímetro WTW PETA (Utilizado para el sedimentador).....	103
<b>Figura C.4.</b> Curva de calibración Conductímetro YCI PETA (Utilizado para la unidad de mezcla lenta).....	103
<b>Figura D.1.</b> Concentración de sulfato en ppm vs abertura del aparato dosificador volumétrico a diferentes caudales. P.T. Pie de Cerro – HIDROCENTRO.....	108
<b>Figura D.2.</b> Curva de calibración del dosificador volumétrico P.T. Pie de Cerro – HIDROCENTRO.....	108
<b>Figura E.1.</b> Curvas granulométricas del medio filtrante. PT- Pie de Cerro.....	110
<b>Figura H.1.</b> Diagrama de Moody .....	122
<b>Figura I.1.</b> Caudal de entrada y de salida de la planta de tratamiento de Pie de Cerro. ....	123

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla II.1.</b> Parámetros de diseño de desarenadores.....	10
<b>Tabla II.2.</b> Parámetros de diseño de mezcla rápida y mezcla lenta.....	11
<b>Tabla II.3.</b> Parámetros de diseño del dosificador del coagulante.....	12
<b>Tabla II.4.</b> Índice de floculación de Willcomb .....	13
<b>Tabla II.5.</b> Parámetros de diseño del sedimentador.....	14
<b>Tabla II.6.</b> Parámetros y criterios de la curva C .....	16
<b>Tabla II.7.</b> Parámetros de la curva F .....	17
<b>Tabla II.8.</b> Parámetros de diseño de los filtros.....	18
<b>Tabla IV.1.</b> Parámetros del desarenador del río Curtidor y del río Gabante.....	53
<b>Tabla IV.2.</b> Parámetros para la unidad de mezcla rápida de la P.T Pie de Cerro.....	53
<b>Tabla IV.3.</b> Parámetros para la unidad de mezcla lenta de la P.T Pie de Cerro.....	54
<b>Tabla IV.4.</b> Parámetros para el sedimentador de la P.T Pie de Cerro. ....	55
<b>Tabla IV.5.</b> Parámetros para los filtros de la P.T Pie de Cerro. ....	56
<b>Tabla IV.6.</b> Parámetros para el dosificador de sulfato de aluminio de la P.T Pie de Cerro .....	57
<b>Tabla IV.7.</b> Resultados de la curva C para el desarenador del río Curtidor.....	60
<b>Tabla IV. 8.</b> Resultados del análisis de Curva F (desarenador río Curtidor). ....	61
<b>Tabla IV.9.</b> Resultados de la curva C-t para la unidad de floculación. ....	62
<b>Tabla IV.10.</b> Resultados del análisis de Curva F.....	63
<b>Tabla IV.11.</b> Resultados de la curva C-t para la unidad de sedimentación.....	66
<b>Tabla IV.12.</b> Resultados del análisis de Curva F (sedimentador). ....	66
<b>Tabla IV.13.</b> Prácticas operacionales.....	68

<b>Tabla IV. 14.</b> Dosis de sulfato aplicada en la planta antes y despues de realizar el prueba de jarros. ....	72
<b>Tabla IV.15.</b> Resultados de simulación de la prueba de jarros realizada en la planta de tratamiento de Pie de Cerro. ....	73
<b>Tabla IV.16.</b> Resultados de simulación de la prueba de jarros realizada en la planta de tratamiento de Pie de Cerro. ....	75
<b>Tabla IV.17.</b> Parámetros operacionales de los filtros de la la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.....	77
<b>Tabla IV.18.</b> Medidas para la mejora de la calidad del agua producida en la planta de tratamiento Pie de Cerro y posibilidad de aplicación en el tiempo .....	84
<b>Tabla IV.19.</b> Clasificación de las medidas para las mejoras en corto, mediano y largo plazo. ....	87
<b>TABLA C.1.</b> Datos de la curva de calibración (desarenador río Curtidor).....	101
<b>TABLA C.2.</b> Datos de las curvas de calibración (Sedimentador y floculador).....	102
<b>TABLA D.1.</b> Tiempo de retención y rpm a diferentes caudales para jarras de 1 litro de sección circular sin deflectores P.T. Pie de Cerro – HIDROCENTRO .....	107
<b>TABLA D.2.</b> Tiempo de retención y rpm a diferentes caudales, para jarras de 2 litro de sección cuadrada <i>P.T. Pie de Cerro – HIDROCENTRO</i> .....	107
<b>TABLA D.3.</b> Dosis de sulfato de aluminio aplicada a los jarros durante la realización de la prueba. ....	109
<b>Tabla E.1.</b> Resultados de la granulometría del material filtrantes proveniente de la planta de tratamiento de Pie de Cerro. ....	110
<b>TABLA F.1.</b> Datos de dosificación de cloro en un día con alta turbiedad y otro con baja turbiedad. ....	111
<b>TABLA F.2.</b> Datos promedios de dosis de cloro en la pre y post-cloración durante el mes de agosto y su respectivo valor de turbiedad.....	112
<b>Tabla H.1.</b> Rugosidad absoluta para distintos materiales .....	121
<b>Tabla I.1.</b> Registro de caudal a la entrada y a la salida de la P.T. Pie de Cerro. ....	123

## INTRODUCCIÓN

La evaluación de una planta de tratamiento de agua es una valiosa herramienta de apoyo en la operación de un sistema de tratamiento, que permite ajustar sus parámetros operacionales en función a la calidad del agua a tratar e identificar defectos de diseño y problemas de operación para obtener la eficiencia deseada, para así efectuar modificaciones que permitan subsanar dichos problemas y transformar el agua cruda en agua tratada que cumpla con características organolépticas, fisicoquímicas y microbiológicas descritas en las normas de potabilización establecidas, de manera de garantizar una mejor calidad del agua potable.

Motivado a esto el presente Trabajo Especial de Grado se enfoca en la evaluación de la planta de tratamiento de agua Pie de Cerro, ubicada en La Victoria- Estado Aragua, que hoy en día abastece dos grandes sectores de la Victoria: la zona industrial de Soco y el casco central de la ciudad, a fin de ejecutar y verificar acciones que logren un mejoramiento del funcionamiento del sistema.

Con aportes de la empresa Hidrocentro C.A., la cual facilitó los medios necesarios para el desarrollo de este trabajo, se realizó una inspección inicial de la operatividad actual de la planta, donde se consideraron todos los componentes del sistema en sus distintas etapas, desde la captación del agua cruda hasta el tratamiento de desinfección, para luego comparar con lo establecido en la literatura y poder detectar sus fallas, a fin de proponer cambios en la operación que produjera mejoras en su funcionamiento.

Los resultados de este trabajo proporcionan información sobre el comportamiento de cada una de las unidades que conforman la planta, que apoyará a la empresa hidrológica en la realización de cambios de aplicación inmediata, de corto y mediano plazo, tanto en las rutinas de operación, como en las modificaciones que requieran las unidades de tratamiento y sirve como guía para la evaluación y aplicación de mejoras en plantas de potabilización con características similares.

# CAPÍTULO I

## FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La evaluación y el ajuste de una planta potabilizadora comprenden un análisis minucioso del funcionamiento y comportamiento hidráulico de cada una de las partes que físicamente la conforman, de su eficiencia y de la forma en que está siendo operada y mantenida.

La planta potabilizadora Pie de Cerro, que abastece el casco central y la zona industrial Soco de La Victoria – Edo. Aragua, es una planta modular no convencional, con parte de sus unidades dispuestas concéntricamente de manera compacta, cuyo modelo no fue concebido originalmente para tratar la calidad de agua de las fuentes de abastecimiento de esta zona, por lo que su operación en ocasiones se hace complicada, en particular cuando en el agua cruda se presentan altos valores de turbiedad. Este hecho ha traído como consecuencia frecuentes paradas en la planta, por lo que se hace necesario realizar un estudio de cada una de las unidades físicas que la conforman, con el fin de determinar los parámetros principales de operación que permitan ajustar su funcionamiento, de manera de obtener una mejora a corto plazo, así como también conocer sus limitaciones reales.

El presente Trabajo Especial de Grado se enfoca en una revisión inicial de la planta de tratamiento de agua Pie de Cerro, a fin de seleccionar, ejecutar y verificar acciones para adecuar el funcionamiento del sistema a las condiciones actuales, con base en la premisa: “siempre se puede hacer mejor”, bajo la filosofía del mejoramiento continuo que permite identificar problemas y trabajar en su resolución, ya que no reconocer las fallas propias es el primer paso para detener el crecimiento (Masaaki,1998). El producto de este trabajo proporciona información básica de las

características de operación de cada una de las unidades que conforman la planta, que servirá de apoyo a HIDROCENTRO, C.A. para realizar mejoras a futuro, tanto en las condiciones de operación, como aquellas que impliquen modificación o rehabilitación de las unidades.

## **1.2 DESCRIPCION DE ANTECEDENTES**

El diagnóstico y evaluación de las plantas potabilizadoras en Venezuela comienza con estudios dirigidos a la determinación de los parámetros de diseño de cada unidad y a su comparación con valores de referencia.

Al igual que en otros sistemas de producción, la evaluación económica de un proyecto para tratamiento de agua potable significa calificarla y compararla con otras propuestas, con el fin de obtener la solución más económica al problema. De esta manera, la alternativa seleccionada debe satisfacer los criterios de factibilidad técnica y económica. La variabilidad de diseños existentes para producir agua que cumpliera con los requerimientos de calidad para consumo humano, condujo a la realización de análisis de costos para orientar la selección de la alternativa más adecuada económicamente.

En tal sentido, Amundaray, Ávila y Blanco (1990), realizaron análisis y comparaciones de costos de obras civiles y de operación, con el fin de aportar una herramienta útil al momento de seleccionar un sistema de tratamiento de agua. Además realizaron el diagnóstico de la situación de las plantas de tratamiento que operaban en el país, registradas en el Instituto Nacional de Obras Sanitarias I.N.O.S. para 1988, con el propósito de establecer comparaciones entre ellas, analizando la influencia de los parámetros determinantes en los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento. Además detectaron problemas hidráulicos en algunas de las unidades de las plantas estudiadas, causados por la operación con caudales mayores a los de diseño o porque el diseño no se ajustaba a la calidad del agua cruda que abastecía la planta. En cuanto a la operación, encontraron que en la mayoría de

las plantas visitadas, no se realizaban pruebas de jarro para dosificar adecuadamente las sustancias químicas requeridas por el tratamiento. Otro factor que afectaba la operación de estos sistemas, era la deficiente preparación de su personal. Observaron la inexistencia de una política de planificación en relación al mantenimiento de los sistemas de tratamiento, reflejada en equipos completamente deteriorados y sin funcionar durante mucho tiempo. Por último, confirmaron la necesidad de disponer de información sobre costos reales tanto de construcción como de operación, ya que ellos incidían no solo en la planificación de las etapas de construcción de plantas de tratamiento, sino también en la selección de la modalidad de tratamiento.

Siguiendo con esta metodología de evaluación de parámetros de diseño y costos de construcción, Amore y Gómez (1990), realizaron un análisis comparativo, con base a diseños teóricos, entre los costos de plantas de tratamiento para potabilización de aguas convencionales y no convencionales tipo modular. En este trabajo se compararon los costos de obra civil obtenidos a partir del diseño teórico con los correspondientes a las plantas de distintas modalidades existentes en el país. Para ello realizaron un programa de computación en lenguaje Basic para dimensionar y diseñar los sistemas y así facilitar los cálculos de los costos. Los mismos tomaron en cuenta para su estudio factores tales como: naturaleza y calidad del agua, población y gasto de diseño, topografía general de la zona, calidad del suelo, dimensionamiento de las estructuras y los costos de inversión inicial y de operación. El análisis de los sistemas de tratamiento permitió determinar los costos de obra civil por unidad de caudal de cada una de las unidades que conforman las plantas de tratamiento, compararlos entre sí y reflejar la influencia de cada unidad sobre el costo total del sistema. Según el análisis realizado se concluyó que las plantas no convencionales tipo modular son mucho más económicas que las convencionales para todos los caudales considerados. Sin embargo para esta comparación solo se estudiaron parcialmente los costos de obra civil y destacaron que debía considerarse la existencia de otros factores, entre los que destaca la calidad del agua a tratar, cuya influencia es determinante en la selección del sistema.

Considerando que otro de los puntos críticos es el mantenimiento en cada una de las unidades que conforman una planta de potabilización, García y Tortolano (1991), elaboraron una metodología que les permitió realizar de forma organizada y efectiva la planificación y programación del mantenimiento en plantas de potabilización convencional y no convencional. Destacaron la importancia del mantenimiento preventivo para garantizar la operación eficiente y obtención de agua apta para su consumo. Determinaron la importancia de planificar y programar las actividades junto con los recursos disponibles, ya que la mayoría de las fallas que observaron eran consecuencia de la falta oportuna de un mantenimiento preventivo. Diseñaron fichas de identificación de instalaciones y equipos, clasificación, contaje y condición, además de planillas de control. Concluyeron que para garantizar la eficiencia del mantenimiento era necesario capacitar a los operarios: conocimiento de los equipos e instalaciones y el funcionamiento de cada una de las unidades, para así definir el tipo de mantenimiento requerido en cada planta.

Partiendo de la importancia del aseguramiento de la calidad a través del proceso de potabilización, Acosta (2008) propuso usar la trazabilidad como herramienta de gestión de calidad en plantas potabilizadoras, usando la metodología de Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control (HACCP), para garantizar el control continuo de la calidad del agua potable. El estudio de la trazabilidad consistió en identificar los Puntos Críticos de Control (PCC) y los Puntos de Atención (PA) en todo el proceso de potabilización. La determinación de dichos puntos permite enfocar esfuerzos y recursos en el monitoreo, registro y seguimiento de las variables que tienen mayor incidencia en la calidad del agua potable producida y en el desempeño del proceso de potabilización.

Acosta concluyó que las situaciones peligrosas que representaban el mayor riesgo para la calidad del agua potable en la planta en estudio, eran: la desinfección no efectiva, las variaciones bruscas de calidad del agua cruda y las fallas de dosificación de coagulante. Se identificó como PA el agua sedimentada y como PC el agua final. Los parámetros a controlar en estos puntos son turbiedad, pH, color,

aluminio y cloro residual, apoyados en un plan de calibración y mantenimiento de los equipos y unidades de tratamiento. Destacó que este análisis de trazabilidad puede ser utilizado de manera referencial pero no extrapolarlo directamente a otra planta.

Siguiendo con la evaluación de plantas potabilizadoras, Ayala (2009), realizó un estudio del desempeño de la planta de potabilización de agua en Los Teranes, Edo Carabobo, donde caracterizó el funcionamiento de cada una de las unidades, comparándolas con lo establecido en el diseño y lo recomendado en la literatura, proponiendo acciones para mejorar su operación. Asimismo con base en un balance de masa estimó las descargas de lodos y agua de lavado en el sistema, así como algunas modificaciones para disminuirlos y minimizar el uso de sustancias químicas, específicamente de coagulantes. Señala que el efluente de la planta cumple con los valores máximos establecidos en las Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable, aunque es químicamente inestable (Índice de Langelier Negativo), pero solo el color presentaba valores inferiores al valor deseable, lo que evidenciaba la necesidad de realizar acciones para mejorar la calidad del agua potable y reducir el consumo de coagulantes. A partir de los resultados de los ensayos de trazadores, identificó marcadas distorsiones en el movimiento del fluido en las unidades de mezcla lenta y sedimentadores, asociado a la presencia de volúmenes muertos y cortocircuitos, que afectaban los tiempos de retención. A partir de los resultados obtenidos, Ayala concluyó, que las unidades de la planta presentaban diferencias con respecto a los parámetros de diseño y operación recomendados y propuso realizar cambios estructurales y operacionales en el proceso.

Una vez que se ha recorrido en este camino de diagnóstico y evaluación de plantas potabilizadoras en Venezuela, surge la necesidad de evaluar la posibilidad de alcanzar mejoras significativas en el funcionamiento en el corto plazo, con el ajuste de prácticas operacionales, por lo que se planteó este trabajo cuyos objetivos se presentan a continuación.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 General**

Evaluar el funcionamiento de la planta potabilizadora Pie de Cerro para ajustar prácticas de operación que conduzcan a un mejoramiento a corto plazo.

### **1.3.2 Específicos**

1. Comparar el funcionamiento actual de cada una de las unidades que conforman la planta con lo establecido en la literatura y/o ficha técnica.
2. Proponer cambios en la operación de la planta que incidan en su mejoramiento.
3. Presentar los cambios en la operación que puedan mejorar el funcionamiento en el corto plazo.

## CAPÍTULO II

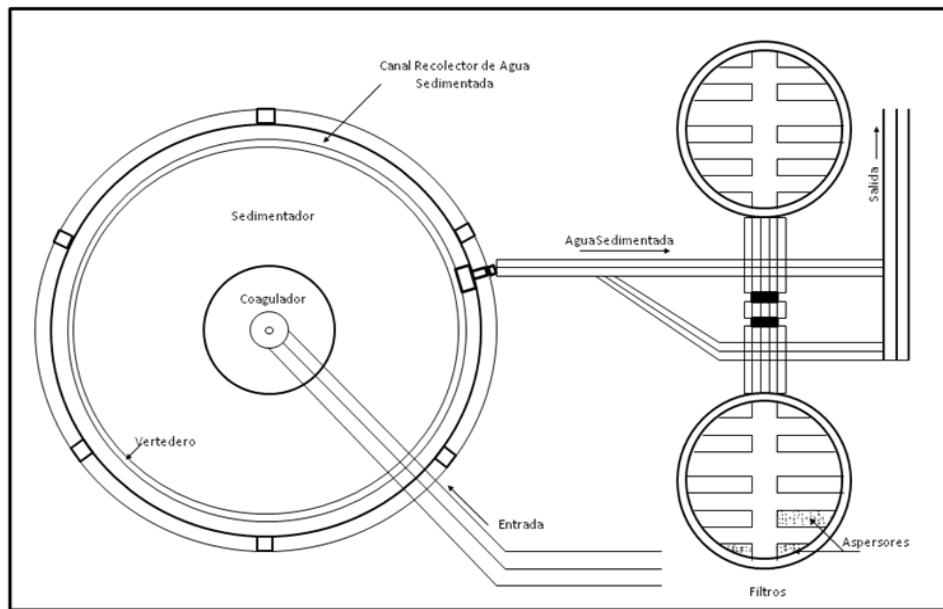
### MARCO REFERENCIAL

Se llama potabilización al proceso por el cual se convierte un agua natural con o sin intervención antrópica, en agua apta para el consumo humano. El proceso de tratamiento con el cual se remueve el material suspendido y los microorganismos, comprende diversas fases: la captación y tratamiento preliminar, coagulación-floculación, sedimentación, filtración y desinfección. En un esquema convencional, estos procesos se llevan a cabo en unidades rectangulares, colocadas secuencialmente, mientras que en los esquemas modulares son cilíndricas o cuadradas, dispuestas de forma concéntrica.

#### **Plantas modulares no convencionales**

Una planta modular no convencional generalmente consiste en tanques de forma cilíndrica o cuadrada dispuestos concéntricamente, donde los procesos de mezcla rápida, mezcla lenta y sedimentación son realizados en una unidad compacta denominada "Coagulador-Sedimentador". Por cada uno de estos módulos, generalmente existen dos unidades filtrantes, de tipo filtración rápida, flujo descendente y medios mixtos: arena y antracita, también en tanques cilíndricos (Najul y Blanco, 2003).

Existe gran diversidad de modalidades bajo el mismo nombre de plantas modulares para el tratamiento de aguas, pero su selección está relacionada con una serie de factores tales como las características del agua cruda y tratada, la eficiencia de los procesos, la viabilidad económica y los aspectos administrativos. En la figura II.1 se presenta un esquema de la configuración de este tipo de planta modular.



**Figura II.1. Esquema de una planta modular. (Adaptado del CEPIS, 1990)**

A continuación se presenta una descripción y caracterización de los aspectos más resaltantes de cada una de las unidades y los procesos que integran una planta de tratamiento de potabilización, bajo el esquema modular, correspondiente a la planta Pie de Cerro, se describen los parámetros operacionales y de diseño que contribuyen a la evaluación, a partir de los cuales se obtiene información valiosa para comprender la determinación de las condiciones que mejoren la eficiencia del sistema.

### **Tratamiento preliminar**

Consiste en eliminar los sólidos de gran tamaño y las arenas que interfieran en las unidades de tratamiento. Esta operación se realiza en unidades de desbaste y desarenadoras. En el desbaste se remueve el material de tamaño apreciable. Los desarenadores generalmente son tanques de flujo horizontal, que retienen las arenas que son abrasivas. Para optimizar la remoción de las partículas se debe operar las unidades desarenadoras en paralelo y realizar una limpieza manual o hidráulica cuando el depósito alcance el nivel previamente establecido en un tiempo mínimo (CEPIS, 2005).

Los principales parámetros de diseño en desarenadores de flujo horizontal son:

- La velocidad horizontal a la que está sometida la partícula por efecto del agua, definida por la sección transversal de la unidad.
- Las dimensiones largo, ancho y profundidad deben ser tales que disminuyan corrientes cruzadas, dificultades de mantenimiento, existencia de espacios muertos y cortocircuitos, etc, lo que se logra con unidades alargadas con relación largo/ancho entre 5 y 9.
- La velocidad de resuspensión o arrastre, es la velocidad horizontal mínima con la que inicia el arrastre de la partícula sedimentada y está relacionada con el tamaño de las partículas.
- La tasa de desbordamiento superficial (TDS) equivale a la velocidad de asentamiento de la partícula expresada en términos del caudal y área superficial de la unidad.
- El tiempo de retención que es el tiempo en que el fluido permanece en la unidad (Arboleda, 2000).

La tabla II.1 resume los principales parámetros de diseño de los Desarenadores.

**Tabla II.1. Parámetros de diseño de desarenadores. (Adaptado del CEPIS, 2005)**

PARÁMETRO DE DISEÑO	ECUACIÓN	OBSERVACIONES
Tiempo de retención teórico ( $\theta_t$ )	$\theta_t = V/Q$	Q= Caudal de la unidad (m <sup>3</sup> /s) V= Volumen de la unidad (m <sup>3</sup> )
Tasa de Desbordamiento Superficial (TDS)	$TDS = Q/A_s$	Q= Caudal de la unidad (m <sup>3</sup> /s) A <sub>s</sub> = Área superficial de la unidad (m <sup>2</sup> )
Velocidad horizontal ( $v_h$ )	$v_h = Q/A_t$	$v_h$ = Velocidad horizontal (m/s) A <sub>t</sub> = Área transversal (m <sup>2</sup> )
Velocidad de resuspensión ( $V_{res}$ )	$V_{res} = 125 \cdot ((S - 1) \cdot d)^{1/2}$	S= Gravedad específica (2,65) d= Diámetro de la partícula (cm)

## Coagulación-floculación

Constituye el proceso básico que determina en gran parte las condiciones de operación de la planta de tratamiento. Se usa para promover la remoción de turbiedad, color, bacterias, virus y organismos patógenos, algas y plancton, sustancias productoras de sabor y olor y de precipitados químicos, mediante la aplicación de sustancias químicas denominadas coagulantes. En este proceso, que se lleva a cabo en unidades de agitación mecánica o hidráulica, la mezcla rápida permite la dispersión de los coagulantes y la mezcla lenta la aglutinación de las partículas (Arboleda, 2000). En ambos procesos el gradiente de velocidad (G), el cual está referido a la intensidad de agitación, y el tiempo de retención son claves para su funcionamiento. La tabla II.2 resume los parámetros de diseño de las unidades de mezcla rápida y mezcla lenta, para la modalidad de agitación hidráulica.

**Tabla II.2. Parámetros de diseño de mezcla rápida y mezcla lenta. (Adaptado del CEPIS, 2005)**

PARÁMETRO DE DISEÑO	ECUACIÓN	OBSERVACIONES
Tiempo de retención teórico ( $\theta_t$ )	$\theta_t = V/Q$	Q= Caudal de operación (m <sup>3</sup> /s) V= Volumen de la unidad (m <sup>3</sup> )
Gradiente de velocidad (G)	$G = \left( \gamma \frac{h}{\mu \cdot \theta_t} \right)^{1/2}$	$\gamma$ = peso específico del agua h= pérdida de carga $\mu$ = Viscosidad absoluta
	<p>Pérdida de carga</p> <p>Mezcla rápida</p> $h_T = f \cdot \left( \frac{L}{D} \right) \cdot \left( \frac{V^2}{2 \cdot g} \right) + \sum K_i \cdot \left( \frac{V^2}{2 \cdot g} \right)$ <p>Mezcla lenta</p> $h_f = K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$	<p>f= Factor de fricción</p> <p>L= Longitud de la tubería (m)</p> <p>D= Diámetro interno de la tubería (m)</p> <p>V= Velocidad media (m/s)</p> <p>g= aceleración de gravedad (m/s<sup>2</sup>)</p> <p>K= Coeficiente de pérdida (adimensional)</p>

El proceso de coagulación-floculación involucra el manejo y dosificación de las sustancias químicas, además de la operación de los equipos dosificadores, así

como su punto de aplicación. Los parámetros de diseño a considerar en el dosificador del coagulante son: el rango de dosificación del equipo, que permite definir la cantidad máxima y mínima de sustancias químicas a añadir según el rango de caudal de agua que ingresa y el tiempo de retención en el tanque de disolución. La tabla II.3 resume los parámetros de diseño del dosificador de coagulante. Los principales factores que influyen en este proceso son: pH, temperatura, alcalinidad, turbiedad y color (CEPIS, 2005) El ensayo que permite controlar el proceso y simularlo es el de las pruebas de jarro.

**Tabla II.3. Parámetros de diseño del dosificador del coagulante. (Adaptado del CEPIS, 2005)**

PARÁMETRO DE DISEÑO	ECUACION	OBSERVACIONES
Caudal del dosificador	$Q_d = v_d * A_d$	$v_d$ = velocidad (m/s) $A_d$ = área del dosificador (m <sup>2</sup> )
Grado de exactitud del dosificador	$P = (Q \cdot D) / 1000$	$D$ = dosis de coagulante (mg/L) $Q$ = caudal de agua que ingresa al tanque de disolución (m <sup>3</sup> /unidad de tiempo) $P$ = peso dosificado (kg/unidad de tiempo)
Rango de dosificación	$P_{max}$ y $P_{min}$	Se determina aforando el equipo, bajo condiciones de máxima y mínima abertura del dosificador. $P_{max}$ : peso máximo que se puede dosificar (kg/unidad de tiempo) $P_{min}$ : peso mínimo que se puede dosificar (kg/unidad de tiempo)
Tiempo de retención del tanque de disolución	$\theta_t = V/Q$	Conocido el volumen del tanque de solución y los caudales máximos y mínimos de agua que entran al tanque se determina el rango de tiempos de retención.

La simulación exitosa de las condiciones de la planta de tratamiento requiere del conocimiento de las características hidráulicas de las etapas de tratamiento, incluyendo mezcla inicial (mezcla rápida), floculación y clarificación, así como su inclusión en el protocolo de la prueba de jarros.

Para obtener resultados comparables a los de la planta, al realizar el ensayo, el tiempo de mezcla rápida debería ser equivalente al tiempo de retención efectivo de la cámara en la planta de tratamiento. Si es posible, el valor de G debería replicar las condiciones de gran escala, calculando la velocidad de agitación (rpm) a aplicar en la

prueba de jarros a partir del G que existe en la unidad de mezcla rápida. También en la unidad de floculación es preciso determinar valores de G y tiempo de retención, así como la velocidad de agitación (rpm) a aplicar en la prueba de jarros, a partir del G que existe en la mezcla lenta de la planta.

Por medio de la prueba de jarros se observa el tamaño del flóculo producido y se lo evalúa cualitativamente según sus características. Su tamaño puede expresarse en mm de acuerdo con el comparador desarrollado por el Water Research Institute de Inglaterra o según el índice de Willcomb, que se incluye en la figura II.2 y la tabla II.4 respectivamente. Se escoge como dosis óptima la de la jarra que produce una partícula más grande, aunque no siempre el mayor tamaño de partículas produce la mayor velocidad de asentamiento aparente y que deje ver el agua más cristalina entre los flóculos (Arboleda, 2000).

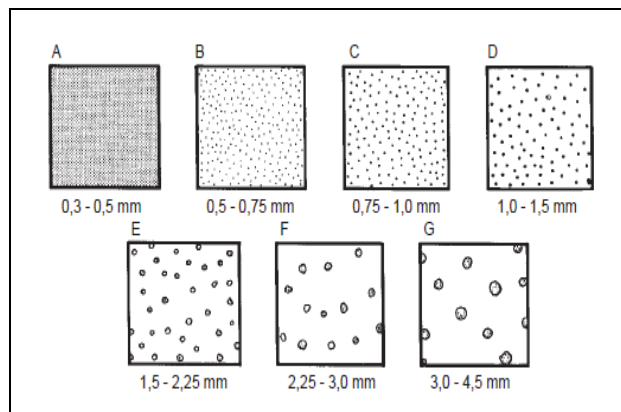


Figura II.2. Comparador para estimar el tamaño del flóculo producido en la Coagulación (según WRA). (Arboleda, 2000)

Tabla II.4. Índice de floculación de Willcomb (Arboleda, 2000).

Número del índice	Descripción
0	Flóculo coloidal. Ningún signo de aglutinación.
2	Visible. Flóculo muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado.
4	Disperso. Flóculo bien formado pero uniformemente distribuido. (Sedimenta muy lentamente o no sedimenta.)
6	Claro. Flóculo de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.
8	Bueno. Flóculo que se deposita fácil pero no completamente.
10	Excelente. Flóculo que se deposita completamente, dejando el agua cristalina.

## Sedimentación

En esta operación se lleva a cabo la separación de los sólidos más densos que el agua y que tienen una caída tal que puedan llegar al fondo del tanque sedimentador en un tiempo económicamente aceptable (CEPIS, 2005). El sedimentador está dividido en cuatro zonas: sedimentación, entrada, salida y lodos, en cada una de estas zonas es indispensable considerar la velocidad promedio de entrada a la unidad, la tasa de desbordamiento superficial, el tiempo de retención y la carga sobre el vertedero. La tabla II.5 resume los parámetros de diseño de un sedimentador de flujo ascendente.

**Tabla II.5. Parámetros de diseño del sedimentador. (Adaptado del Arboleda, 2000)**

PARÁMETRO DE DISEÑO	ECUACIÓN	OBSERVACIONES
Tiempo de retención teórico ( $\theta_t$ )	$\theta_t = V/Q$	Q= Caudal de operación (m <sup>3</sup> /s) V= Volumen de la unidad (m <sup>3</sup> )
Tasa de Desbordamiento Superficial (TDS)	$TDS = Q/A_s$	Q= Caudal de la unidad (m <sup>3</sup> /s) A <sub>s</sub> = Área superficial de la unidad (m <sup>2</sup> )
Velocidad promedio de entrada a la unidad	$v_{ent} = \frac{Q}{A_t \text{ paso}}$	Q= Caudal de la unidad (m <sup>3</sup> /s) A <sub>t</sub> = Área transversal de paso (m <sup>2</sup> )
Carga unitaria de vertederos	$CUV = \frac{Q}{L_{vert}}$	Q= Caudal de la unidad (m <sup>3</sup> /s) L <sub>vert</sub> = longitud de vertedero

En la prueba de jarro también se puede simular la etapa de sedimentación. No es correcto ni práctico reproducir el tiempo de retención de la escala real en una prueba de jarro, es decir, la captación de la muestra no debe esperar ese tiempo. Para obtener resultados acordes con el funcionamiento de la planta, debe considerarse el tiempo resultante de la tasa de desbordamiento superficial (T<sub>S</sub>), es decir T<sub>S</sub> = d / TDS, donde d es la distancia fija entre la superficie y el punto de captación de la muestra y TDS es la tasa de desbordamiento superficial real en el sedimentador, expresada en términos de velocidad (cm/min) (op.cit.).

Para evaluar el comportamiento hidráulico de las unidades descritas se pueden determinar los parámetros hidráulicos mediante pruebas de trazadores (op.cit.). En plantas que tienen un funcionamiento completamente hidráulico, el análisis de este comportamiento y sus desviaciones respecto a los criterios y parámetros hidráulicos de diseño, resultan primordiales para la comprensión del sistema, para la estimación de la eficiencia de cada una de las unidades y para proponer modificaciones para mejorar su funcionamiento.

Los parámetros a considerar son: el tiempo de retención y distribución del tiempo de residencia con lo cual se conocen las características del flujo en el interior del reactor (proporción de flujo pistón y flujo mezclado), el caudal, la presencia de espacios muertos y cortocircuitos en las unidades de mezcla y sedimentación.

Para el análisis de las características de un reactor se utilizan el modelo matemático desarrollado por Wolf y Resnick y el análisis de la curva de tendencia o curva de Gauss y la curva de distribución de concentración acumulada. En una unidad bajo condiciones reales de funcionamiento (flujo no ideal; o sea con cierto grado de mezcla, cortocircuitos, zonas muertas, corrientes de inercia, etc.), al medir y graficar la concentración del trazador a la salida en función del tiempo, se obtiene una curva similar a la mostrada en la figura II.3.

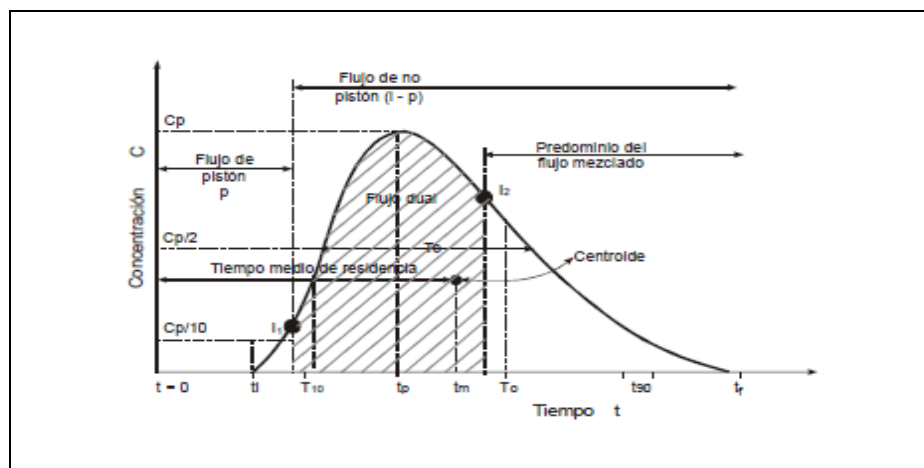


Figura II.3 Curva de distribución de concentración (curva C) (CEPIS 2005).

De la curva de distribución (figura II.3) se pueden obtener los siguientes parámetros y criterios, los cuales son presentados a continuación en la tabla II.6.

**Tabla II.6 Parámetros y criterios de la curva C. (Adaptado del CEPIS, 2005)**

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIONES
$t_i/t_o$	$t_i$ = tiempo inicial $t_o$ = tiempo teórico de retención = $V/Q$ .	Mide los cortocircuitos grandes y es: =1 para flujo pistón. =0 para flujo mezclado.
$t_m/t_o$	$t_m$ = tiempo mediano (50% de la cantidad del trazador).	Su lenta salida implica desplazamiento del centroide y aumento del valor de $t_m$ ( $t_m > t_o$ ). <1 existen cortocircuitos hidráulicos. >1 existen espacios muertos o error experimental.
$t_p/t_o$	$t_p$ = tiempo modal (máxima concentración)	=1 solo existe flujo pistón. =0 existe flujo mezclado. Si $t_p/t_o$ se aproxima a 1 y $t_i/t_o > 0,5$ ; existe predominio de flujo pistón. Si $t_p/t_o$ se aproxima a 0; existe predominio de flujo mezclado.
$e = ((t_f - t_p) - (t_p - t_i))/t_o$ (Excentricidad)	$t_f$ = tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador al reactor.	= 0 para flujo pistón. >2,3 para flujo mezclado.
$IM = t_{90\%}/t_{10\%}$ (Índice de Morrill)	$t_{10}$ = tiempo correspondiente al paso del 10% de la cantidad total del trazador. $t_{90}$ = tiempo correspondiente al paso del 90% de la cantidad total del trazador.	Cercano a 1, baja dispersión. Se aleja de 1, mayor dispersión.

La figura II.4 representa la curva F, la cual es definida como una función de distribución acumulativa, la misma se utiliza para describir la concentración acumulativa de la sustancia trazadora a la salida (midiendo la concentración en el reactor en función de su concentración inicial ( $C/C_o$ )) (Fogler, 2001). Además sirve para verificar los resultados obtenidos en la curva C. La tabla II.7 contiene los parámetros que se obtienen de la curva F.

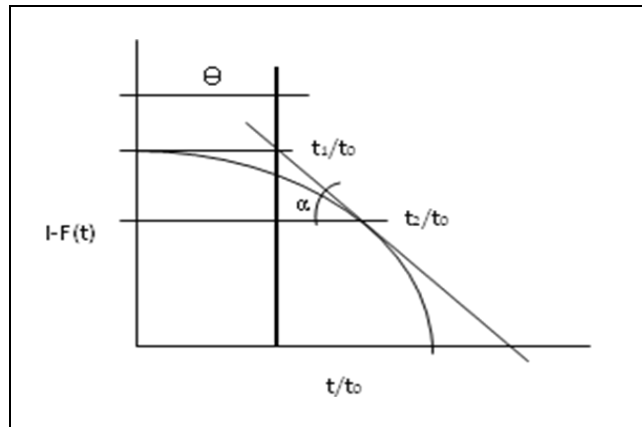


Figura II.4 Curva de distribución de concentración acumulada (curva F) (CEPIS, 2005).

Tabla II.7. Parámetros de la curva F. (Adaptado del CEPIS, 2005)

Parámetro	Descripción
$\theta$	Desviación del flujo pistón. Igual a 1 para régimen flujo pistón y 0 para mezcla completa
$\alpha$	Ángulo de la tangente a la curva
P	Fracción flujo pistón = $(\theta \operatorname{tg}\alpha) / [(0,435 + \theta \operatorname{tg}\alpha)]$
M	Fracción de volumen muerto = $1 - (\theta/p)$
1-p	Fracción de flujo no pistón

## Filtración

Consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso. La función de estas unidades en el esquema convencional es de pulimento, para lo cual no deben recibir un agua decantada con más de 2 UNT. En la operación se debe tener en cuenta que la velocidad de filtración se mantenga constante y entre los límites previstos durante todo el proceso, la calidad de agua del filtro debe ser un efluente con menos de 0,10 UNT para garantizar que esté exento de huevos de parásitos. La expansión del medio filtrante debe variar de acuerdo con el tipo de lavado disponible en la instalación, si es retrolavado con agua debe generar entre 25 a 30% de expansión y para lavado con aire y agua debe ser igual a 10% de expansión (Consonery, 1996).

Las características del medio filtrante desempeñan, un papel importante en la eficiencia del proceso, principalmente el diámetro y la granulometría del material filtrante, la velocidad de filtración, la pérdida de carga y la calidad del agua filtrada son las variables del proceso más fáciles de controlar y posiblemente de mayor significado en la operación del filtro (Arboleda, 2000). La tabla II.8 resume los principales parámetros de diseño de los filtros.

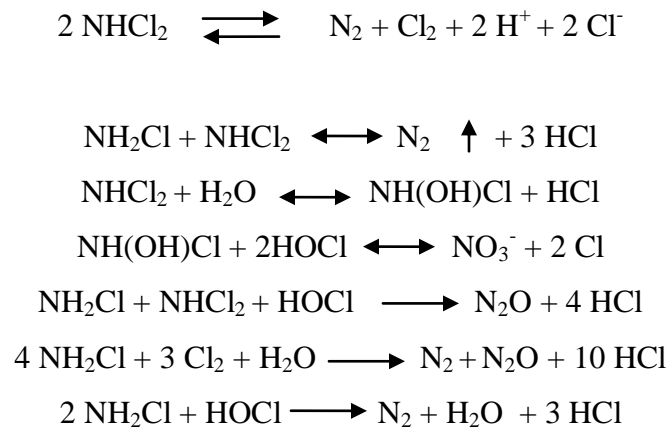
**Tabla II.8 Parámetros de diseño de los filtros (Adaptado del CEPIS, 2005)**

PARÁMETRO DE DISEÑO	ECUACIÓN	OBSERVACIONES
Tasa de filtración	$T_f = \frac{Q}{A_f}$	$A_f = (\text{Largo} \times \text{ancho}, \text{m}^2)$ $T_f$ : Tasa de filtración ( $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ )
Caudal de filtración	$Q_f = T_f * A_f * N^\circ \text{ filtros}$	$Q_f$ : Caudal de filtración ( $\text{m}^3/\text{d}$ )
Granulometría del medio filtrante	$d_e = P_{10}$ $CU = P_{60}/P_{10}$	$d_e$ : Diámetro efectivo (mm) $CU$ : Coeficiente de uniformidad $P_{60}$ : abertura del tamiz que dejaría pasar el 60% (mm) $P_{10}$ : abertura del tamiz que dejaría pasar el 10% (mm)

## Desinfección

Consiste en la destrucción de organismos patógenos presentes en el agua. El método de desinfección más aplicado en los sistemas de abastecimiento de agua es el que emplea el cloro y sus compuestos derivados como agentes desinfectantes. La cantidad necesaria de desinfectante está en función del caudal de agua a tratar, los organismos a destruir, el tiempo de contacto disponible, puntos posibles de aplicación y la clase de desinfectante que se forma en el agua ( $\text{HOCl}$ ,  $\text{OCl}$ ,  $\text{NH}_2$ ,  $\text{Cl}$ , etc.) según sea el pH y el contenido de nitrógeno de ella (Cáceres, 1990). La turbiedad es otro factor de peso en la desinfección, ya que una excesiva turbiedad reducirá la efectividad, por lo que se recomienda una turbiedad menor de 5 UNT, siendo lo ideal menos de 1UNT.

El ensayo de demanda de cloro permite realizar la curva del punto de quiebre que consiste en graficar el cloro residual como función del cloro añadido en una muestra de agua a iguales condiciones de proceso. Esta curva muestra diferentes etapas dependiendo de los compuestos presentes en el agua. Así, sustancias orgánicas y materia fácilmente oxidable (Fe, Mn, H<sub>2</sub>S, entre otros) reaccionan con el cloro para producir mayormente ión cloruro, de manera que todo el cloro añadido es consumido (demanda). Luego que se ha consumido la demanda, el cloro reacciona con el amoníaco para producir distintas cloraminas que a medida que se va agregando cloro, se descomponen según las siguientes reacciones:



En esta etapa la curva llega a un punto mínimo, llamado punto de quiebre, a partir de ahí la curva empieza a ascender y el cloro residual aumenta en proporción directa a la dosis añadida. En este sentido cuando el cloro es el único desinfectante aplicado en el tratamiento de agua, se recomienda la cloración dejando un residual después del punto de quiebre, lo que significa que la dosis de cloro sea suficiente para oxidar todo el amoníaco y superar la demanda. Cuando se sigue añadiendo cloro al agua después del punto de quiebre, se asegura la desinfección y deja un residual más estable en el agua que previene la proliferación de los microorganismos en un período prolongado (op.cit.). La forma general de esta curva se muestra en la figura II.5 que se muestra a continuación.

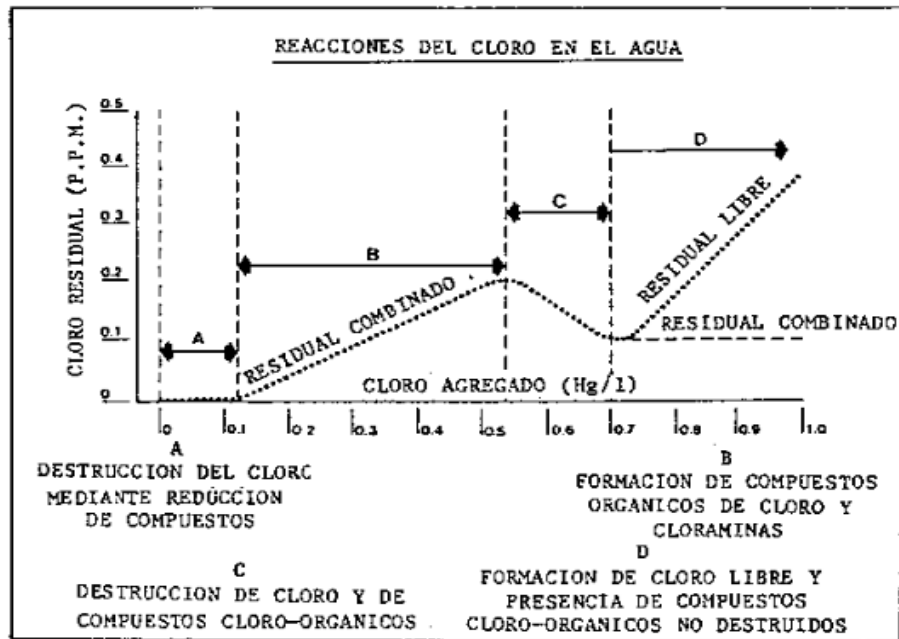


Figura II.5. Curva General de demanda de cloro (Cáceres, 1990).

Es importante destacar que todas estas zonas se presentan cuando existe nitrógeno amoniacal en el agua, pues de no ser así, sólo se dan las reacciones relativas a la zona A y D.

### Punto de aplicación del cloro

La selección del punto de aplicación es de bastante importancia. Este punto debe ser tal que el cloro tenga contacto con toda la masa líquida y pueda distribuirse con gran rapidez dentro de ella.

Algunos autores han estudiado la influencia de la mezcla rápida en conexión con la aplicación del cloro al agua. De acuerdo con ellos parece evidente que la rápida dispersión del cloro en la masa de agua, produce un aumento de la eficiencia del proceso, similar al que se obtiene con la dispersión instantánea de los coagulantes (Arboleda, 2000).

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

A continuación se explica el método empleado para el cumplimiento de los objetivos planteados en el presente trabajo de investigación. Se describe las actividades y procedimientos que se utilizaron en la evaluación del funcionamiento de la Planta Potabilizadora Pie de Cerro asociado a cada uno de los objetivos específicos.

#### **1. Comparación del funcionamiento actual de las unidades que conforman la planta con lo establecido en la literatura y/o ficha técnica.**

##### **1.1 Descripción de la planta Pie de Cerro.**

De acuerdo a la información preliminar suministrada por HIDROCENTRO C.A., no se dispone de memoria descriptiva ni planos de diseño y/o construcción de la planta potabilizadora, sólo existe una ficha técnica que contiene alguna información de la planta. Por esta razón, para lograr una completa descripción de la misma, se inició con un recorrido por toda la planta observando detalladamente el proceso, a fin de conocer el sistema a cabalidad.

Se realizaron las mediciones y registros fotográficos de cada una de las unidades que conforma la planta de manera de poder elaborar un plano general de la misma, señalando sus dimensiones principales. Además, se realizó un Diagrama de Flujo de Procesos (DFP), todo esto con la finalidad de generar un documento de referencia útil para la planta y además obtener toda la información necesaria, a fin de poder efectuar un diagnóstico previo que permita orientar los recursos necesarios para la evaluación de los procesos

más críticos. Vale destacar que se presenció un vaciado y limpieza general de la unidad de coagulación, floculación y sedimentación, por lo cual se obtuvo una visión en detalle de la conformación de estas unidades.

## **1.2 Revisión y análisis de caudal y parámetros de calidad del agua**

Se recopilaron los registros existentes en los tres últimos años (2008, 2009 y 2010) de datos de caudal producido, así como de los parámetros de calidad del agua: turbiedad, color aparente, pH, conductividad específica y cloro residual. Con estos datos se construyeron gráficos que permitieron identificar el comportamiento de la planta durante este período y se realizó el análisis de cada una de las curvas obtenidas.

Los valores de caudal fueron procesados para la realización de un histograma de frecuencia que permitió obtener condiciones extremas (máximos y mínimos), así como el caudal más frecuente con el que opera la planta.

Los datos de calidad del agua cruda, tratada y en algunos casos de la sedimentada (turbiedad) se procesaron en tablas y gráficos, lo cual permitió establecer tendencias, así como verificar su condición de potabilidad, en el caso del agua tratada. Para ello se compararon los parámetros de calidad con la Gaceta 36.395 de 1998 “Normas Sanitarias de Calidad de Agua Potable”.

## **1.3 Determinación de los parámetros de diseño y su desviación con respecto a los valores obtenidos a partir del caudal de operación actual.**

Utilizando las dimensiones de cada unidad que conforman la planta de tratamiento Pie de Cerro y la información de la operación de la planta, se efectuaron los cálculos para determinar sus principales parámetros de diseño, a partir de las ecuaciones establecidas en la literatura. Además, se estableció

su diferencia con los parámetros actuales de operación utilizando para el cálculo el caudal más frecuente, el máximo y el mínimo.

#### **1.4 Determinación del comportamiento hidráulico de las unidades.**

El análisis del comportamiento hidráulico y sus desviaciones respecto a los criterios y parámetros hidráulicos establecidos, se obtuvieron a través de la realización de ensayos de trazadores en algunas de las unidades que conforman la planta potabilizadora, tales como: desarenador del río Curtidor, unidad de floculación y sedimentación.

En el ensayo se usó una solución de cloruro de sodio (sal común), con una concentración conocida, mediante inyección instantánea y uniforme en el afluente de la unidad que se analizó. Previamente se tomó una muestra de agua del afluente y se prepararon soluciones de sal a distintas concentraciones para construir las respectivas curvas de calibración, con las cuales se pudo realizar la curva de distribución de concentración (curva C) y la curva de concentración acumulada (curva F). Esta curva permitió aplicar el método de Wolf-Resnick, que apoyado en los resultados del análisis de la curva C permitió determinar los parámetros hidráulicos.

Para la realización del ensayo en el desarenador del río Curtidor se disolvieron 2 kg de trazador en agua proveniente del afluente de la unidad, en concentración inferior a la solubilidad de la sal (35%).

En la unidad de mezcla rápida correspondiente al primer cilindro concéntrico que conforma esta unidad se inyectó el trazador, ya que el agua de allí se dirige a la mezcla lenta a través de codos ubicados en la parte superior y de allí por la parte inferior al sedimentador. Se disolvieron 36 kg de trazador en agua captada del afluente de la unidad, cantidad suficiente para alcanzar la concentración necesaria en el sedimentador, cabe destacar que esta

concentración era muy elevada para agregarla en la unidad de mezcla lenta, por lo que podrían existir errores de dilución.

Una vez inyectada la solución se midió la conductividad específica a la salida de cada unidad, para ello se utilizaron tres conductímetros (Marcas: YSI y WTW) y con los datos obtenidos se construyeron las diferentes curvas de conductividad en función del tiempo.

### **1.5 Observación de las prácticas operacionales.**

Se inició con una inspección inicial, para ello se efectuó un recorrido por toda la planta, desde la captación, pasando por la dosificación de sustancias químicas y por cada uno de los procesos de tratamiento, se tomaron notas de las prácticas operacionales como: la dosificación de sustancias químicas y el análisis fisicoquímico que los operadores realizaban de las muestras de agua cruda, sedimentada y tratada, así como la frecuencia con que realizaban los mismos. Durante este recorrido, se preguntó a los operadores acerca de cualquier factor que pudiese estar limitando la producción.

Se observaron las rutinas de operación y cómo y cuándo realizaban las actividades de limpieza y mantenimiento a cada una de las unidades. Entre otras se verificó si los operadores realizaban los análisis en el tiempo requerido y se observó la respuesta de los operarios, en los momentos en que se presentó alguna eventualidad. Para ello fue necesaria la presencia frecuente en las instalaciones de la planta.

El registro fotográfico de cada una de las unidades, en conjunto con esta observación de la operatividad y mantenimiento, permitieron completar el diagnóstico preliminar de la planta potabilizadora.

Para presentar los resultados del análisis, se utilizaron cuadros que señalan para cada unidad, la práctica operacional observada (cómo lo realizaban), las

recomendaciones sugeridas, con base en las referencias bibliográficas (cómo lo deberían hacer) y un informe que permitió presentar las propuestas de mejora.

## **2. Proposición de cambios en la operación que incidan en su mejoramiento.**

### **2.1 Determinación de los parámetros operacionales.**

Se determinaron los parámetros operacionales que intervienen en los procesos de tratamiento de agua, teniendo en cuenta la calidad del agua cruda, las sustancias químicas que se utilizaban y los recursos humanos y materiales para la operación y el mantenimiento.

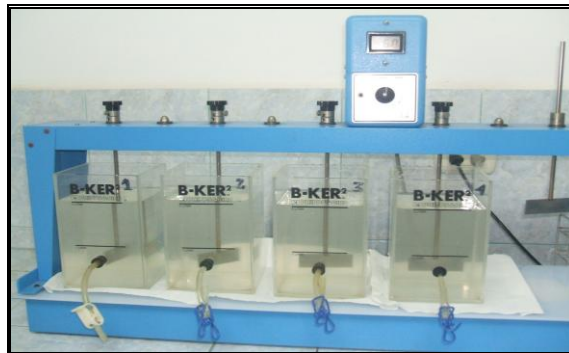
Los parámetros operacionales más importantes considerados fueron:

- **Caudal de operación:** La planta no dispone de un medidor de caudal a la entrada de la planta, sino a la salida, en un punto alejado de la planta y sujeto a una alta variabilidad, todo lo cual limita el conocimiento real del caudal de operación. Para tratar de compensar esta limitación se intentó instalar un caudalímetro portátil, pero no se consiguió un tramo de tubería recta accesible. La mejor estimación del caudal a la entrada de la planta pudo realizarse en la tubería de salida del desarenador del río Curtidor, cuando estaba fuera de servicio la toma del río Gabante.
- **Dosificación de coagulante:** Las dosis óptimas de coagulante se determinaron mediante el ensayo de prueba de jarros ajustado al funcionamiento de la planta, simulando las condiciones reales de operación utilizando los tiempos de retención, gradientes de velocidad y la tasa de desbordamiento superficial, calculados con el caudal de entrada a la planta estimado al momento de la realización de las pruebas. Como se mencionó

anteriormente, a pesar de los esfuerzos realizados, los valores de caudal determinados tienen una confiabilidad limitada.

A continuación se describe la rutina de realización de los ensayos:

1. Medición de caudal, determinación de parámetros de calidad del agua cruda, sedimentada y filtrada (turbiedad, color aparente, pH y conductividad) y aforo del dosificador, para lo cual se construyó la curva de calibración del equipo de dosificación (ver apéndice D, tabla D.2).
2. Determinación del gradientes de velocidad y tiempos de retención en las unidades de mezcla rápida y mezcla lenta, así como la tasa de desbordamiento superficial en el sedimentador, utilizando el caudal determinado, indicado en el aparte anterior.
3. Determinación de las condiciones de operación de la prueba de jarros: velocidad angular (rpm) equivalente para las fases de mezcla rápida y lenta en el ensayo de jarros y tiempo de captación de la muestra sedimentada.
4. Realización del ensayo de jarros para obtener la dosis óptima (ver figura II.6)
5. Aplicación de la dosis óptima en planta y determinación de los parámetros de calidad del agua tratada resultantes.



**Figura II.6. Equipo de prueba de jarros utilizado en la planta de tratamiento Pie de Cerro.**

Para la determinación de la dosis óptima de coagulante utilizando diferentes dosis de sulfato de aluminio en cada jarra (ver apéndice D, tabla D.3), se utilizó el índice de floculación de Willcomb para la descripción de los flóculos producidos, se determinó el tiempo inicial de formación floc y con el comparador de la Water Research Association (WRA) se estimó el tamaño del flóculo producido en la coagulación.

Se realizó un instructivo para los operadores de la P.T. de Pie de Cerro (ver apéndice C) el cual facilitará la simulación de la prueba de jarros, pues allí obtendrá según el caudal, cada uno de los parámetros necesarios para la realización de la prueba. Existe una limitante ya que en la planta, uno de los equipos de pruebas de jarros no sobrepasa las 200 rpm por lo tanto no se puede realizar la simulación con este equipo, ya que no se adapta a las necesidades de la planta de tratamiento.

- **Determinación de las tasas de filtración y lavado de filtros:** para ello se requirió conocer la velocidad de filtración, la velocidad de lavado (ascendente) y el área superficial del filtro. Las velocidades se determinaron a partir de la medición del tiempo de descenso o ascenso (retrolavado) del agua en una distancia preestablecida, utilizando una vara, cinta métrica y cronómetro, así como las dimensiones (largo y ancho) de la unidad.

Para conocer el tiempo de estabilización de los filtros, se capturaron muestras del agua filtrada inmediatamente después del proceso de lavado, a la salida de cada uno de los filtros, en intervalos de 1 minuto durante 10 minutos y 5 minutos durante los siguientes 20 minutos. Los dispositivos que permitieron hacer estas mediciones constituyeron una de las propuestas realizadas durante la realización de este trabajo y fue implementada por el personal de la planta en el corto plazo.

- **Expansión del lecho filtrante (E):** el procedimiento consistió en colocar sobre el lecho filtrante, en el punto opuesto a la salida del agua de lavado, una vara calibrada con envases situados cada 5 cm (ver figura II.7). Después de culminado el tiempo de lavado se retiró la varilla y se observó cuántos envases estaban llenos de material filtrante y así se determinó la altura alcanzada por el material granular en el punto de medición durante el proceso de lavado. Luego se procedió a calcular el porcentaje de expansión del lecho filtrante. Este procedimiento se repitió en cada uno de los filtros.



Figura II.7. Instrumento utilizado para medir la expansión del lecho en los filtros, P.T. de Pie de Cerro.

- **Tiempo de lavado:** para esta actividad se procedió al lavado del filtro de manera normal, se captaron muestras del agua de lavado que desbordaba de las canaletas desde el inicio del lavado en intervalos de 30 segundos, hasta culminar el proceso que duró entre 5 y 6 minutos. Luego a estas muestras se les determinó la turbiedad y se realizó la curva de turbiedad en relación con el tiempo en papel logarítmico-aritmético. La determinación del punto de inflexión de dicha curva, permitió identificar el tiempo óptimo de proceso de lavado (CEPIS, 2005).

- **Granulometría del lecho filtrante:** Como apoyo a la evaluación del comportamiento de las unidades de filtración, se tomó una muestra del lecho filtrante para realizar los ensayos granulométricos y determinar si los parámetros: diámetro efectivo y coeficiente de uniformidad se encontraban en el rango recomendado. Para ello se construyó un muestreador que consta de un tubo de hierro galvanizado de 2 pulgadas de diámetro y 0,9 cm de altura y un tapón que se quita al introducir el tubo con movimientos giratorios en el material filtrante y se pone al sacarlo, en su base se colocó una especie de tapa con cortes para evitar la pérdida del material recolectado. El mismo se introdujo en el lecho filtrante reiteradas veces con el fin de obtener una muestra representativa del lecho, sin embargo no pudo garantizarse la presencia de medio granular proveniente de todas las capas. La muestra fue almacenada en bolsas para su traslado a la Planta Experimental de tratamiento de agua, donde realizaron el ensayo granulométrico.
- **Demanda de cloro:** se captaron muestras del agua cruda a las cuales se les añadieron diferentes concentraciones de cloro. Luego de transcurrido un tiempo de 15 minutos, se determinó el valor de cloro residual en cada muestra utilizando el método del DPD volumétrico, que consiste en agregar una solución tampón de fosfato y una solución de dietil-p-fenilén (DPD) a cada muestra de agua tornando una coloración rosada. Posteriormente se tituló con una solución de sulfato ferroso amoniacal hasta observar la decoloración, el volumen (ml) utilizado en la titulación indicó la concentración de cloro residual (WPCF, APHA y AWWA, 1992). Con estos resultados se construyó la curva de demanda de cloro y se determinó la cantidad de cloro necesaria para mantener un residual libre de 1 mg/l, establecido por la norma.

## **2.2 Factibilidad de aplicación de medidas para la mejora.**

Una vez determinados los parámetros de operación, éstos fueron comparados con los valores esperados, de acuerdo a las referencias consultadas.

Con base en la revisión de experiencias anteriores y consulta al personal técnico que labora en la planta, se tomaron notas de las sugerencias propuestas por ellos y se identificaron los ajustes y/o modificaciones que permitieran mejorar el funcionamiento de las unidades en el proceso de potabilización y de acuerdo con la posibilidad o implementación de estas medidas para las mejoras se clasificaron en de aplicación inmediata en el corto, mediano o largo plazo de acuerdo con la disposición del material, equipos y personal.

Se analizó la factibilidad técnica y económica de cada una de las medidas para las mejoras de acuerdo con la disposición del material, equipos y personal, y se clasificaron de acuerdo a su posibilidad de aplicación o implementación inmediata en el corto, mediano o largo plazo. Para ello se construyó una tabla que permitió clasificar los problemas y sus posibles soluciones.

### **3. Presentación de los cambios en la operación para mejorar el funcionamiento.**

Se procedió a la presentación e implementación de las mejoras consideradas como de aplicación en el corto plazo que proporcionaban una mejora en la operación de la planta de tratamiento. Para ello se contó con el apoyo del personal de la planta, específicamente del personal de Hidrocentro C.A. y de la cooperativa que opera la planta potabilizadora. Nuevamente se menciona que algunas propuestas como la dosificación de sulfato de aluminio y la instalación de “toma muestras” a la salida de los filtros fueron implementadas durante el desarrollo de este trabajo.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 1.1 Descripción de la Planta Pie de Cerro.

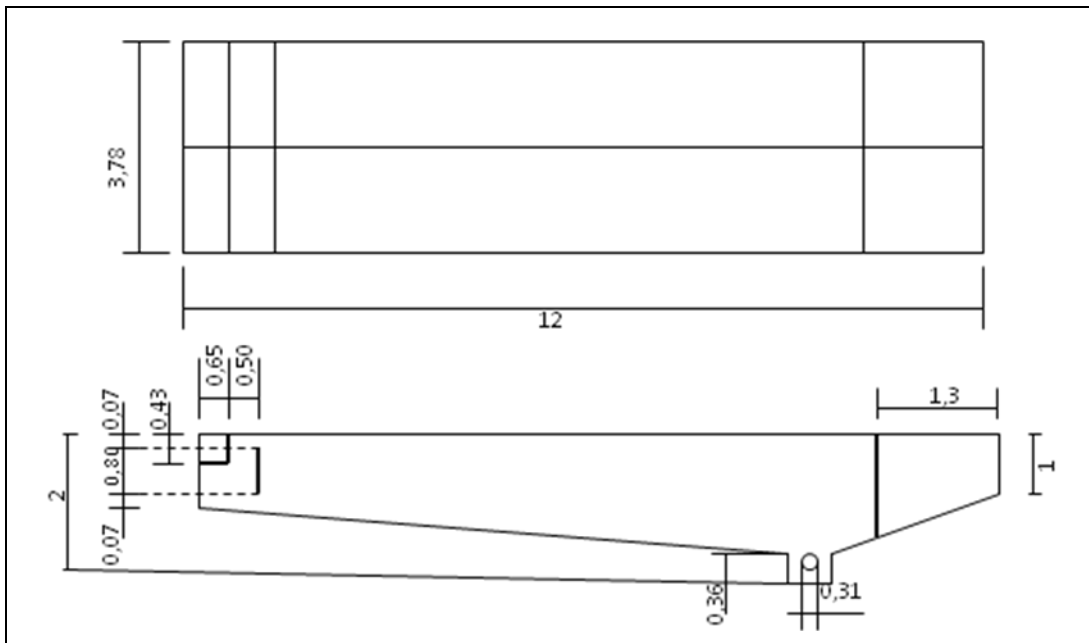
La planta de tratamiento de agua Pie de Cerro, ubicada en la carretera La Victoria-Colonia Tovar, sector Pie de Cerro a 145 Km del Distrito Capital, fue construida en el año 1989 y abastece el casco central y la zona industrial Soco de La Victoria – Edo. Aragua.

Esta planta, de tipo modular no convencional, cuyo funcionamiento es completamente hidráulico, fue diseñada, según informaciones verbales, para tratar un caudal de 150 l/s proveniente de dos fuentes de abastecimiento superficiales: el río Gabante y el río Curtidor, aportando este último el 75% del caudal total con que opera la planta, es decir, 113 l/s, por lo que el caudal que aporta el río Gabante es de 37 l/s.

Es importante mencionar que la planta opera con un caudal menor al de diseño, el cual es de 120 l/s, donde 90 l/s corresponden al río Curtidor y los 30 l/s restantes al río Gabante. La obra de captación es de tipo superficial mediante dique-toma. El diseño de esta planta no fue concebido para tratar la calidad de agua de estas fuentes de abastecimiento, información suministrada verbalmente, por lo que se presume que su construcción partió del hecho de que los costos de obra civil de plantas modulares no convencionales eran menores con respecto a los de plantas convencionales, hecho que se sustenta por el estudio realizado por Amore y Gómez (1990) descrito anteriormente. La planta cuenta con unidades de pre-tratamiento, módulo de clarificación y la correspondiente desinfección.

El río Curtidor tiene dos desarenadores rectangulares con flujo horizontal que operan en paralelo. El dispositivo de entrada consiste en un muro con abertura en la parte inferior por la cual entra el agua al desarenador. La zona de salida es a través de

otro muro que también ocupa todo el ancho del desarenado, la zona de recolección de lodos está constituida por una tolva con capacidad para depositar los lodos sedimentados y una tubería y válvulas para su evacuación periódica. El efluente de los desarenadores es conducido por tuberías a la planta de tratamiento. La figura IV.1 y la figura IV.2 muestran las fotos y dimensiones de estas unidades ubicadas cerca del dique del río Curtidor.



Nota: las unidades están dadas en [m]

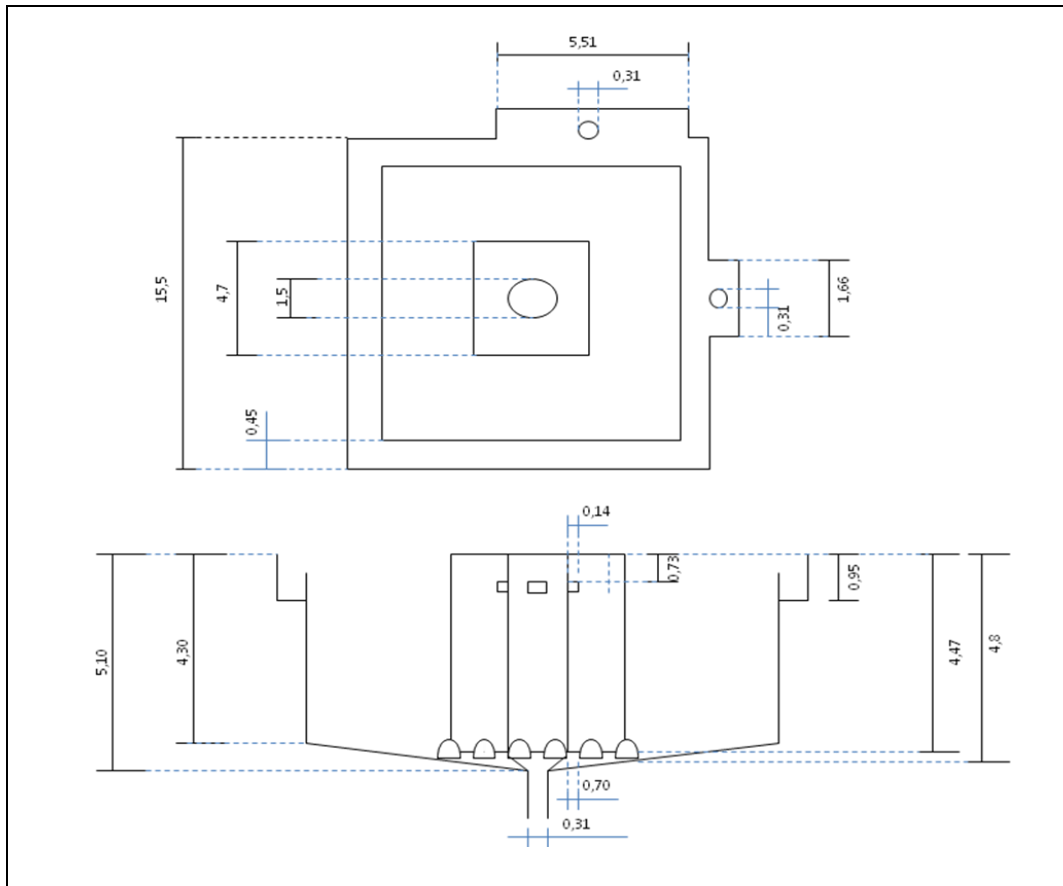
**Figura IV.1. Esquema dimensional de los desarenadores del río Curtidor.**



**Figura IV.2. (a y b). Desarenadores del río Curtidor.**

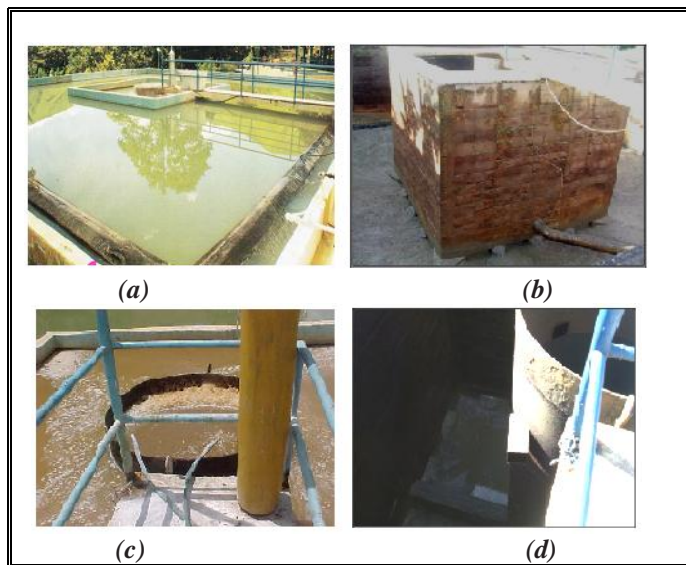
El río Gabante tiene un solo desarenador rectangular con flujo horizontal. Cabe destacar que no se realiza una descripción detallada de la unidad, ya que la misma ha sufrido transformaciones producto de las reparaciones que se le han realizado a causa de los daños ocurridos por el crecimiento del río, dejándolo fuera de operación en dos oportunidades, por largos períodos de tiempo, coincidiendo con el momento de realización de este trabajo. Asimismo es importante mencionar que debido a los elevados valores de turbiedad que alcanza este río en algunos momentos de lluvia, en muchas ocasiones la planta opera sólo con el caudal que proporciona el río Curtidor (90 l/s).

En esta planta no convencional, los procesos de coagulación, floculación y sedimentación ocurren en una unidad compacta, dispuesta de forma concéntrica de la siguiente manera: la mezcla rápida se realiza en la tubería de entrada de agua cruda a la planta, la cual conduce el agua al primer cilindro concéntrico, el mismo posee a pocos centímetros de la superficie codos en  $45^\circ$  que conducen el agua a la unidad de mezcla lenta hidráulica, produciendo un movimiento circular para la formación de los flóculos. Esta segunda unidad concéntrica de sección cuadrada posee en su base ventanas rectangulares por las cuales pasa el agua desde la parte inferior de la mezcla lenta al último cuadrado concéntrico, que actúa como la unidad de sedimentación, en donde se produce un flujo ascendente. El agua sedimentada se extrae mediante vertederos perimetrales, ubicados en todo el contorno del módulo, de donde se conduce a las unidades de filtración. Cabe mencionar que esta unidad compacta es de base cónica, la cual contiene una tubería para la descarga de lodos que van hacia el río Curtidor, aguas abajo de la toma. A continuación se presenta las figuras IV.3 y IV.4, donde se muestra dicha unidad compacta.



Nota: las unidades están dadas en [m]

**Figura IV.3.** Esquema dimensional de la unidad compacta de la planta de tratamiento Pie de Cerro.



**Figura IV.4.** (a, b, c y d). Unidad compacta de la planta de tratamiento Pie de Cerro

Las sustancias químicas utilizadas como insumos son las siguientes:

- Coagulante: sulfato de aluminio sólido, aplicado por un dosificador en seco volumétrico. En caso de fallas de este dosificador, se aplica por carga en la unidad de mezcla rápida, desde un tanque donde se prepara la solución.
- Ayudante de coagulación: poliacrilamida en solución dosificada por bombeo en la unidad de mezcla lenta. El polímero se dosifica eventualmente. La figura IV.5 muestra el equipo dosificador de sulfato de aluminio.



**Figura IV.5. Dosificador de sulfato de aluminio de la planta de tratamiento Pie de Cerro.**

- Desinfectante: gas cloro dosificado mediante inyección al vacío. La figura IV.6 muestra la sala de cloración de la planta.

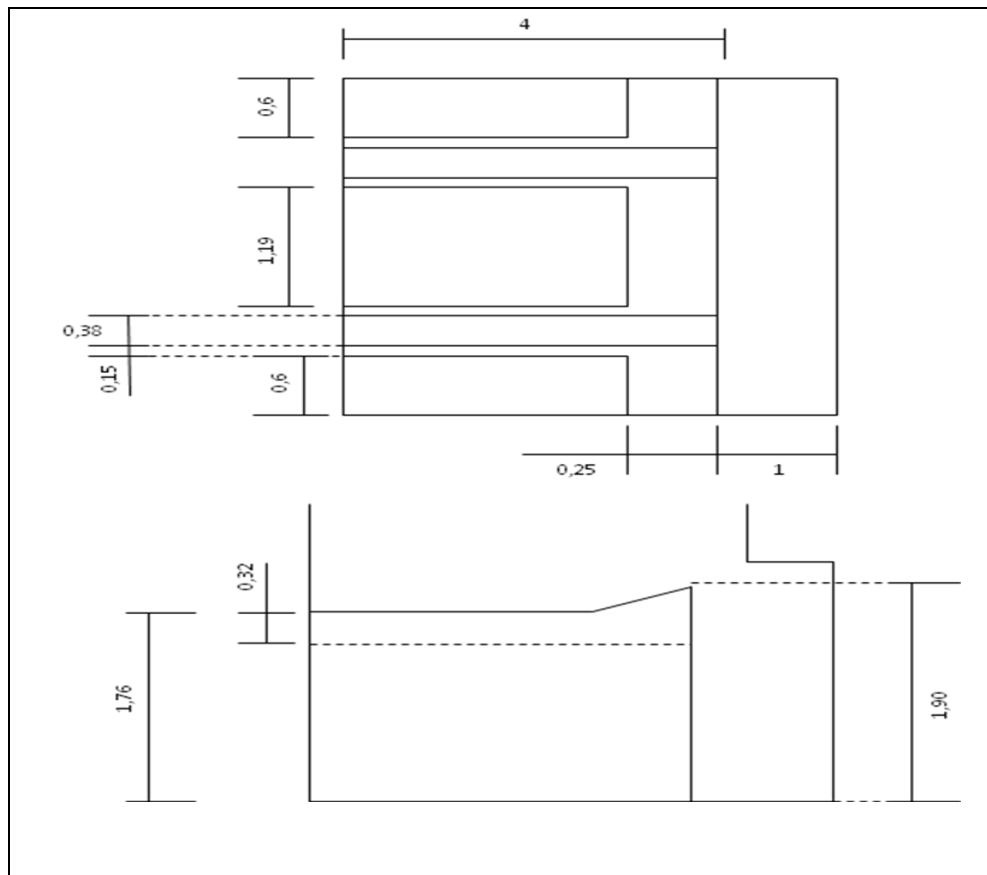


**Figura IV.6. Sala de cloración de la planta de tratamiento Pie de Cerro.**

En el apéndice A aparece la ficha técnica con el detalle de cada una de las unidades y equipos que conforman la planta.

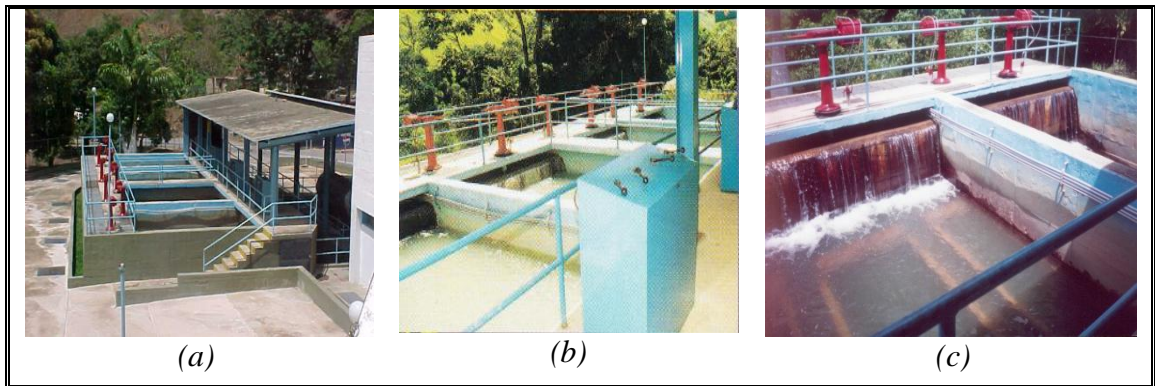
Las operaciones de mantenimiento y limpieza de cada una de las unidades que conforman la planta se realizan de forma manual.

La unidad de filtración consta de cuatro filtros rápidos por gravedad de lecho mixto (arena y antracita) con fondo tipo Wheeler y grava como soporte, aunque el caudal total afluente es repartido solo en tres (3) unidades. A continuación se presenta en la figura IV.5 y la figura IV.6 las fotos y las dimensiones de los filtro. El retrolavado sólo se realiza con agua.



Nota: las unidades están dadas en [m]

**Figura IV.7. Esquema dimensional de los filtros de la planta de tratamiento Pie de Cerro.**



**Figura IV.8. (a , b y c). Filtros de la planta de tratamiento Pie de Cerro.**

Seguidamente se muestra, en las figuras IV.9 y IV.10, el Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) de la Planta de Tratamiento de agua de Pie de Cerro.

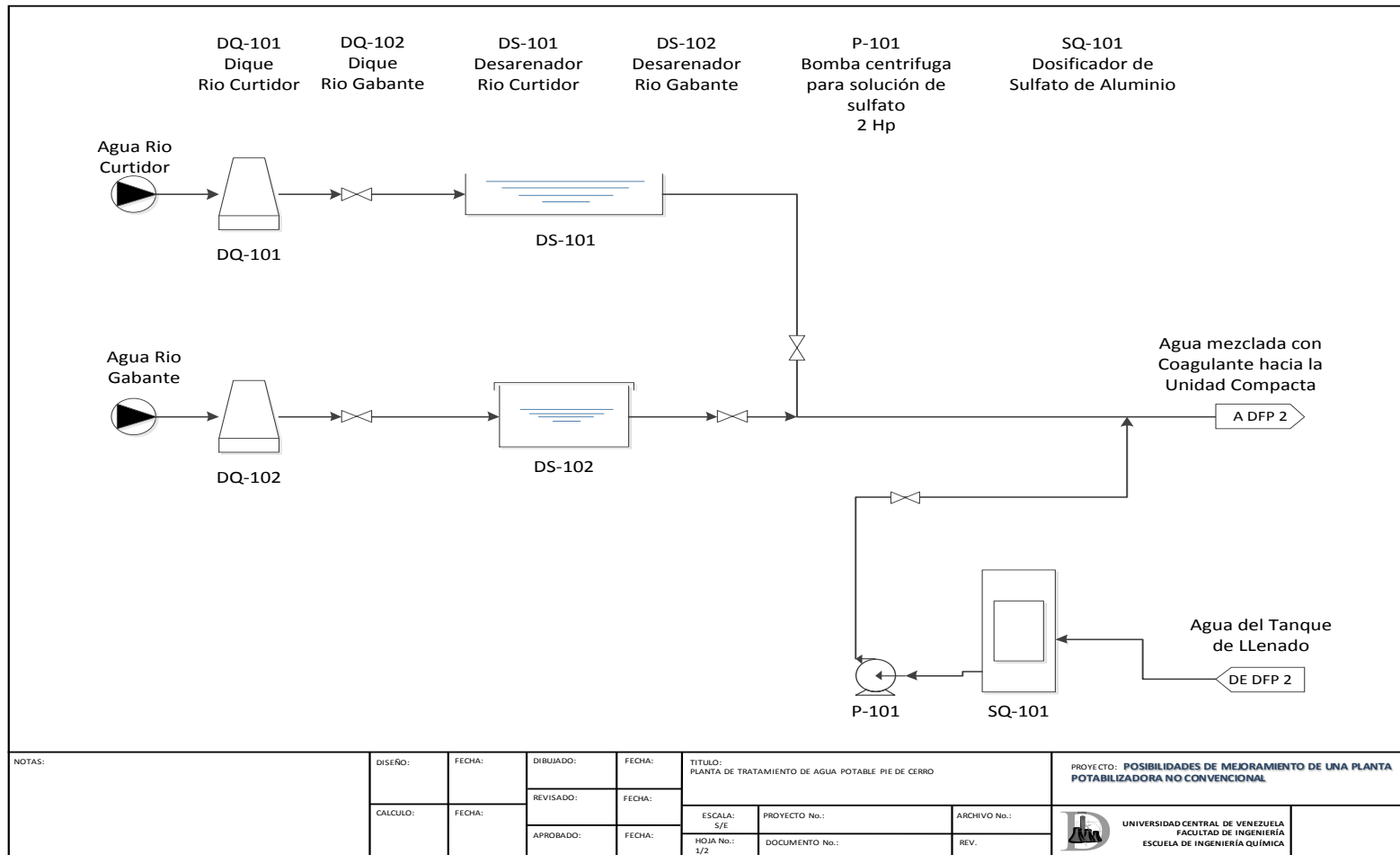


Figura IV.9. Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) de la Planta de Tratamiento de agua de Pie de Cerro.

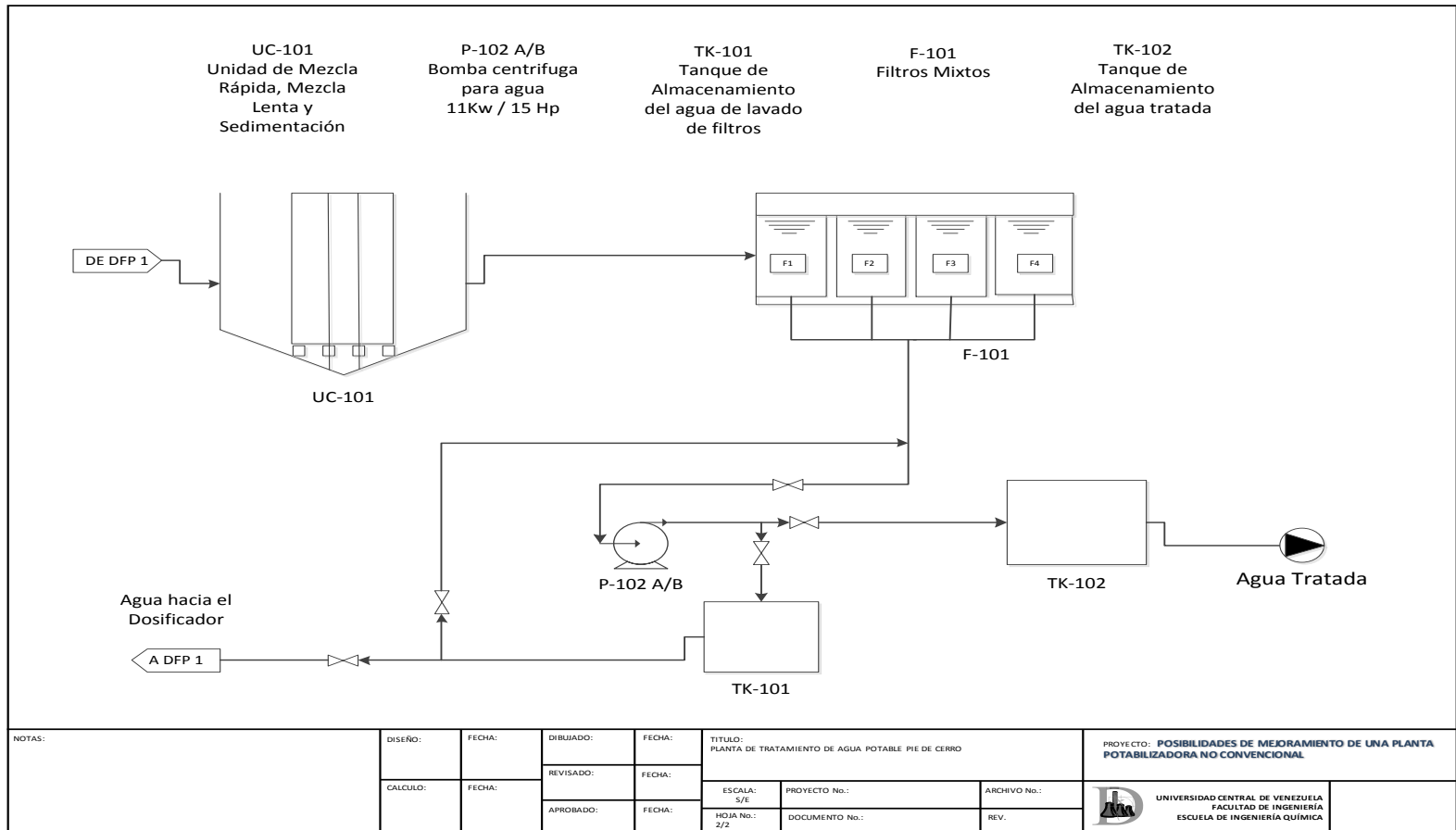
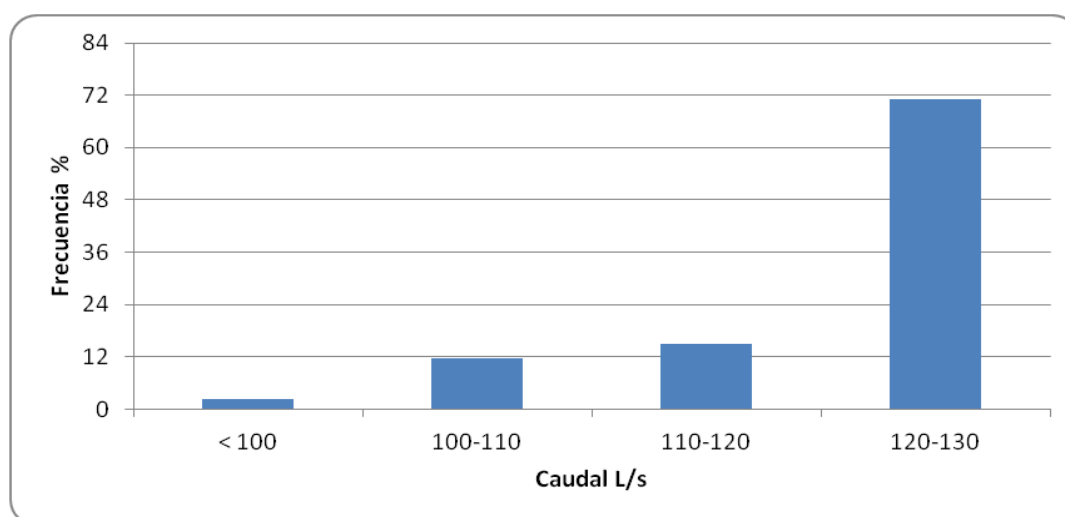


Figura IV.10. Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) de la Planta de Tratamiento de agua de Pie de Cerro (continuación)

## 1.2 Análisis de caudal, consumo de sustancias químicas y parámetros de calidad.

Es imprescindible conocer la variación del caudal con que opera la planta, ya que esto es determinante al momento de realizar los cálculos y definir el tratamiento que se va a aplicar.

La figura IV.11 muestra la distribución del caudal registrado entre los años 2008 al 2010 a través de un histograma de frecuencia.



**Figura IV.11. Caudal de operación de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.**

Se puede observar que el 71% del tiempo la planta opera con un caudal que se encuentra entre 120 y 130 l/s siendo 120 l/s el caudal con mayor frecuencia, ya que el 48% del tiempo se opera con este caudal y en el restante 23% entra los caudales mayores a este. Es importante destacar que durante la realización del trabajo se observó que en diversas ocasiones la planta operaba solo con el río Curtidor (90 l/s); esto no se ve reflejado en la data suministrada y procesada.

Asimismo se destaca que la medición del caudal no se hace rutinariamente, por lo cual estos valores se pueden considerar más una estimación que una medición real.

A continuación se presentan las principales características fisicoquímicas (turbiedad, color, pH y conductividad) del agua cruda y tratada, en sus valores máximos, mínimos y promedio. Se refleja la calidad del agua, así como la remoción y eficiencia del proceso en términos de estas características.

### Características del agua cruda

La figura IV.12, representa los valores de turbiedad para los años 2008, 2009 y 2010.

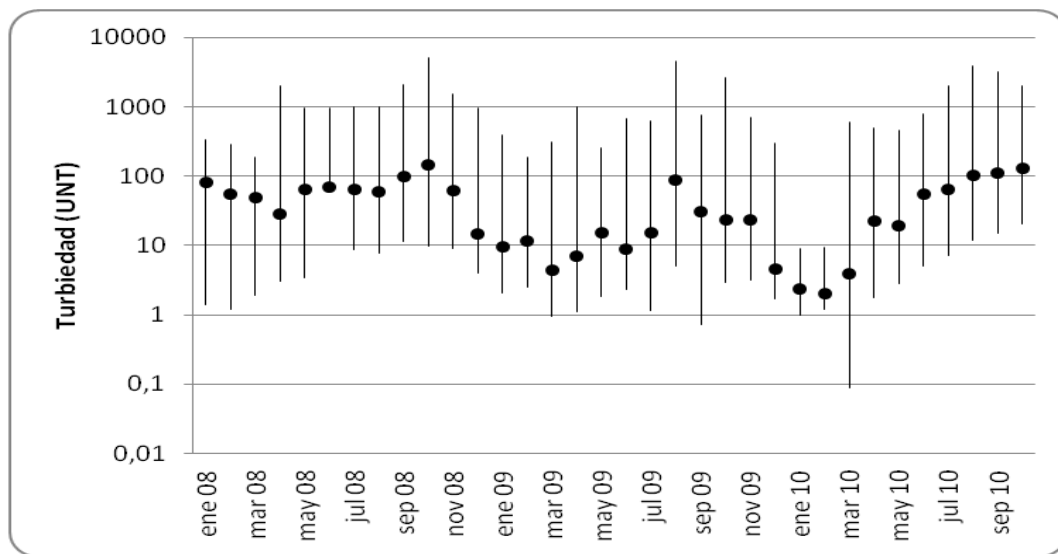
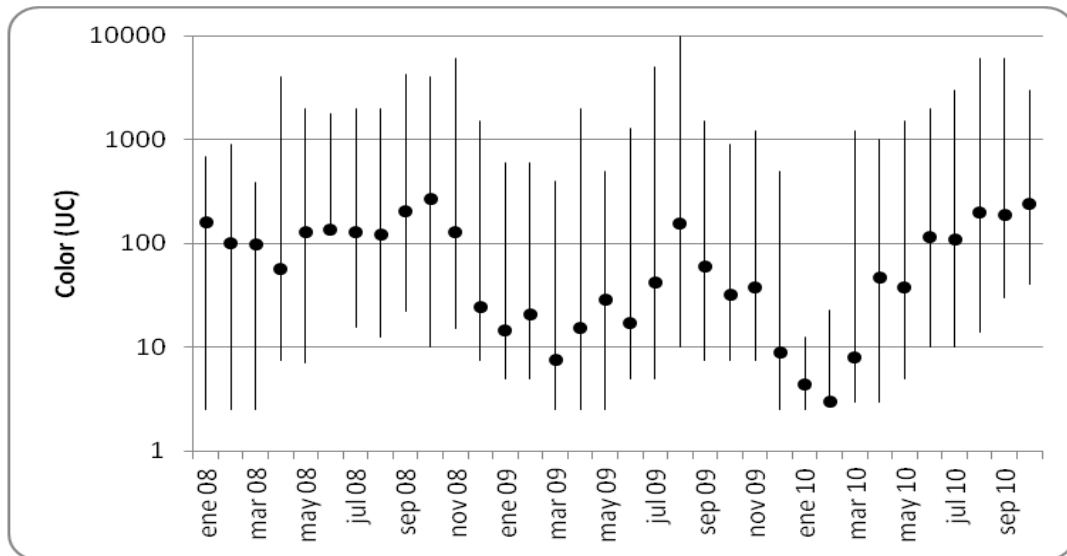


Figura IV.12. Turbiedad del agua cruda de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.

En la figura IV.12 se puede observar que el agua cruda de las fuentes de abastecimiento presentó una amplia variabilidad de los valores de turbiedad durante todo el período evaluado, destacando los meses de septiembre y octubre de 2008 y los últimos meses del 2010, donde los valores promedio fueron más elevados, hecho que pudiera deberse a las altas precipitaciones presentes en estos meses. Cabe destacar que la planta no opera cuando la turbiedad del agua cruda supera las 1000 UNT. También es importante observar las variaciones estacionales temporales, entre los meses de diciembre a marzo se presentan las menores turbiedades, al menos en los dos últimos años, y entre agosto y octubre los más altos valores de turbiedad.

En vista de que no se dispone de un registro de turbiedad de cada una de las fuentes de abastecimiento por separado, por observación directa y experiencia de los operarios se puede constatar que la turbiedad más alta la presenta el río Gabante, razón por la cual cada vez que se reportan altos valores de turbiedad se coloca fuera de servicio este río evitando la parada de la planta. Es importante señalar que el turbidímetro mide hasta 1000 UNT, para medir valores de turbiedad mayores a este valor, los operadores realizan una dilución hasta obtener un valor que pueda ser leído por el turbidímetro y la misma se registra en la hoja diaria.

A continuación se presenta la figura IV.13, la cual representa los valores de color aparente del agua cruda para los años 2008, 2009 y 2010.



**Figura IV.13. Color aparente del agua cruda de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.**

La figura IV.13 refleja más o menos el mismo comportamiento que la gráfica de los valores promedios de turbiedad, debido a que este color es el aparente. Se puede observar que los valores más elevados de color se presentan en septiembre y octubre de 2008 y en los meses de octubre y noviembre de 2010, se presume que su aumento se debió a los períodos lluviosos y por ser la fuente de abastecimiento superficial se tendrá gran cantidad de sedimentos arrastrados por las lluvias lo cual

contribuye a un aumento del color aparente, al igual que ocurrió con el aumento de turbiedad.

Para observar aún mejor la relación que tiene el color aparente con la turbiedad se presenta a continuación la figura IV.14, en la cual se puede notar como ambas curvas siguen la misma tendencia, donde el color aumenta con la turbiedad, con lo cual se confirma que los elevados valores de color aparente se deben mayormente a la presencia de sólidos suspendidos y no a la presencia de sólidos disueltos.

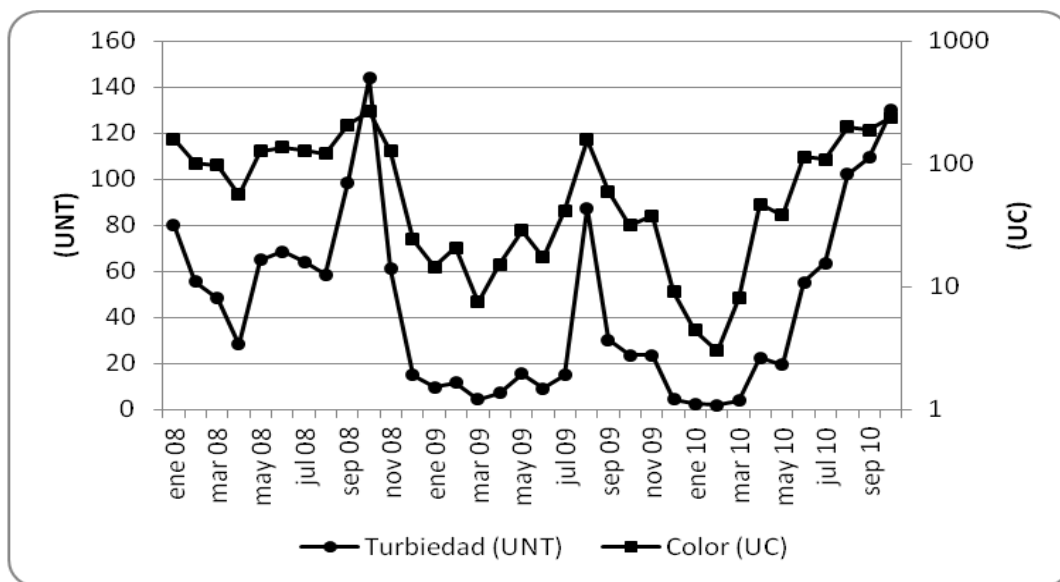
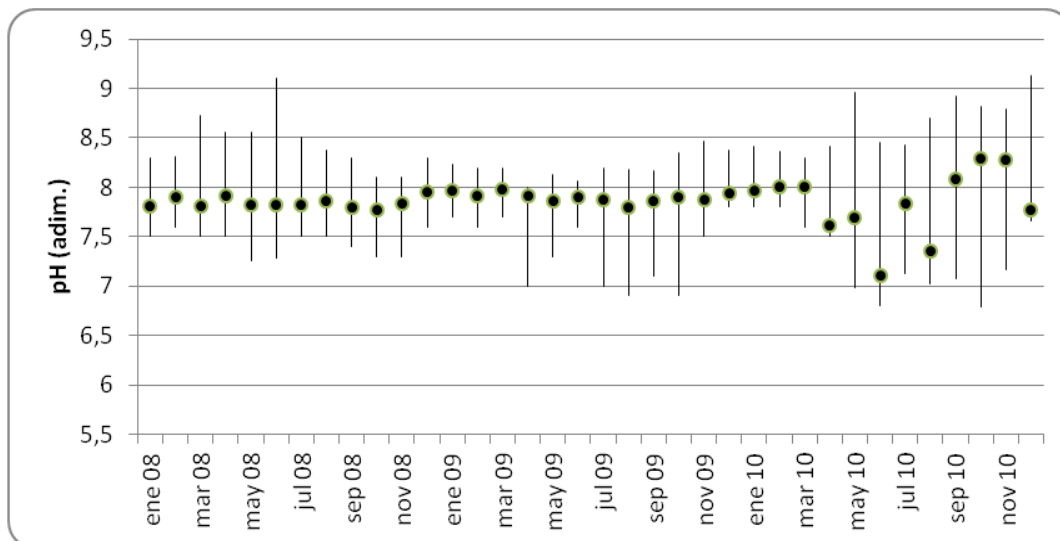


Figura IV.14. Valor promedio de turbiedad y color del agua cruda de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.

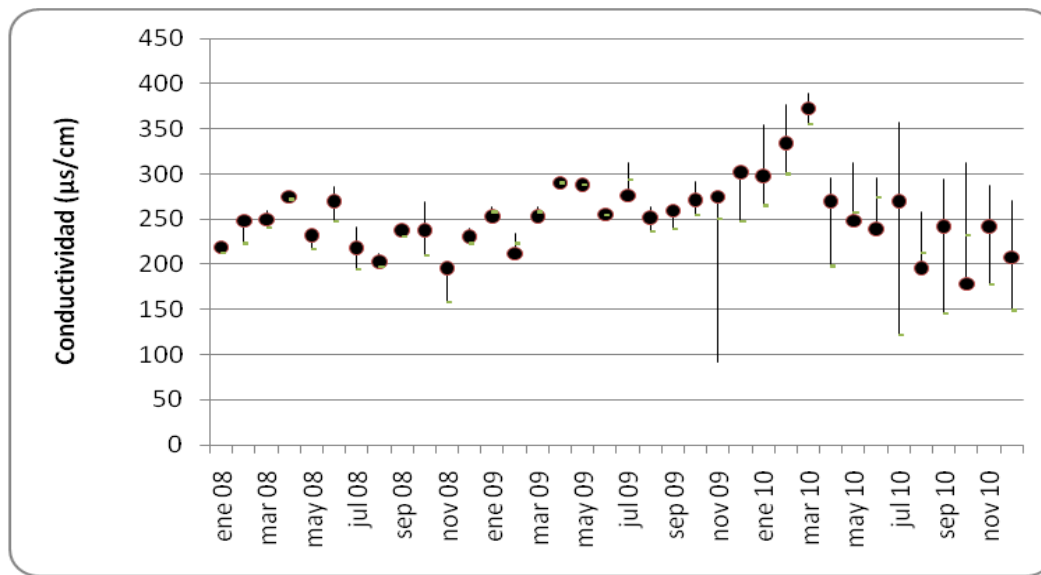
A continuación la figura IV.15 presenta los valores de pH reportados para los años 2008, 2009 y 2010.



**Figura IV.15. pH del agua cruda de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.**

En la figura anterior (figura IV.15) se puede observar que el pH tiene un comportamiento similar en el período que corresponde a los años 2008 y 2009. Sin embargo para el año 2010 existe variabilidad en este parámetro, lo que seguramente sea producto del cambio ocurrido este último año del equipo utilizado para realizar esta medición.

Los valores de la conductividad están muy influenciados por la cantidad de iones presentes en el agua, siendo calcio, magnesio, cloruros y sulfatos los más importantes. Según esta teoría, la conductividad de un agua debería aumentar al aumentar la concentración iónica. En la figura IV.16 se muestran los valores de conductividad del agua cruda reportados para los años 2008, 2009 y 2010.



**Figura IV.16. Conductividad específica del agua cruda de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.**

La fuente de abastecimiento presenta valores de conductividad del agua cruda comunes a los de aguas superficiales Figura (IV.16) y oscila aproximadamente entre 175 – 375 µs/cm. Nuevamente se observa una ligera diferencia en el comportamiento a partir de abril 2010, similar a lo ocurrido con el pH, también asociado a la incorporación de los nuevos equipos para la medición, y a una mayor frecuencia en la medición del parámetro.

Según los resultados obtenidos en el análisis de cada uno de los parámetros del agua cruda se observó, que la misma tiene una variabilidad estacional que obedece a las condiciones climatológicas. Es por esto que la planta de tratamiento presenta un mejor funcionamiento en épocas de sequía y mayores inconvenientes en épocas lluviosas, ya que existe vulnerabilidad de las tomas, sobre todo la toma del río Gabante como se mencionó anteriormente, no sólo en términos de la calidad, sino también de la cantidad, cuando no es posible incorporar agua cruda del río Gabante, por problemas en la captación e inclusive crecidas que dejan fuera de servicio el desarenador.

## Características del agua potable

A continuación se presenta la figura IV.17, la cual representa los valores de turbiedad del agua tratada de la planta de tratamiento Pie de Cerro para los años 2008, 2009 y 2010.

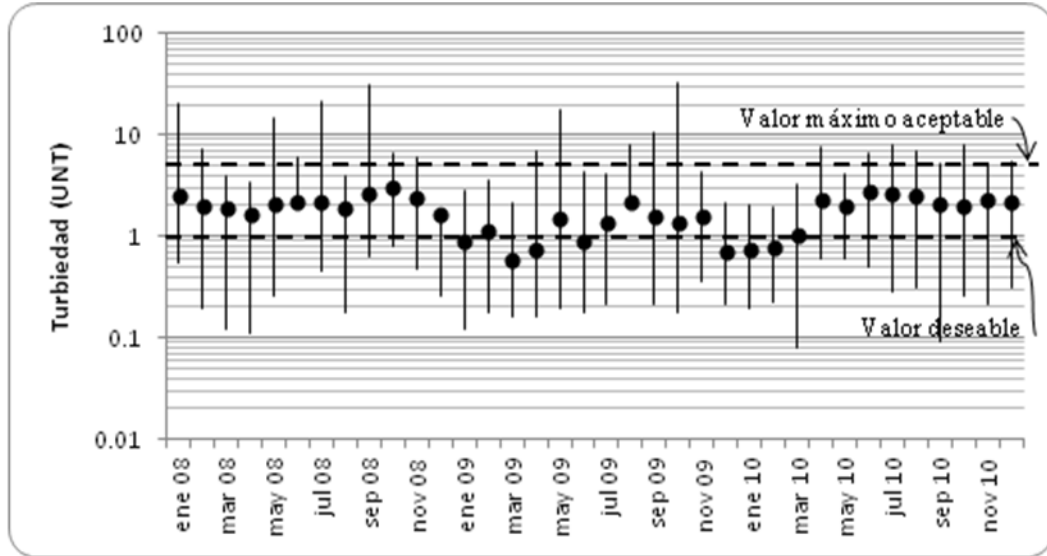


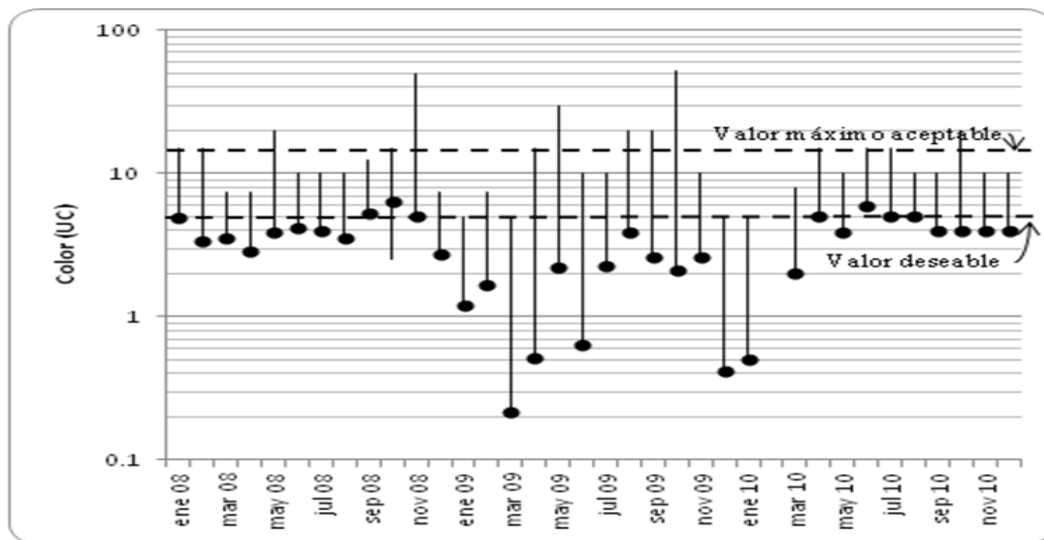
Figura IV.17. Turbiedad del agua potable de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.

La variación de la turbiedad en el agua tratada se puede apreciar en la figura IV.17, donde los valores promedios de turbiedad para cada uno de los años en estudio oscilaron entre 0 y 4 UNT. Se puede notar que muy pocos valores promedio se encuentran por debajo del valor deseable (1 UNT), todos se encuentran por debajo del valor aceptable (5 UNT), pero con frecuencia se presentan valores puntuales que superan las 5 UNT. Cabe destacar que los valores promedios más altos se registraron para los años 2008 y 2010, donde también se presentaron las mayores turbiedades del agua cruda, con lo cual se evidencia una limitación del sistema para operar con turbiedades de 100 UNT y superiores.

Al comparar los valores de turbiedad del agua cruda con los de agua potable (ver figuras IV.12 y IV.17) se evidencia la alta incidencia de la variabilidad del agua cruda en la eficiencia de la planta, coincidiendo los meses con mayores valores de

turbiedad, con los valores de turbiedad del agua tratada superiores a 1 UNT, e incluso a 5 UNT. Cabe resaltar la importancia de lograr valores de turbiedad menores a 1 UNT, para garantizar la protección contra los microorganismos patógenos (medidos indirectamente a través de las determinaciones de coliformes fecales y totales). El análisis de esta variable confirma la necesidad de implementar mejoras en el proceso de potabilización que incidan en la calidad del agua tratada.

La figura IV.18, representa los valores del color aparente (UC) del agua tratada de la planta de tratamiento Pie de Cerro para los años 2008, 2009 y 2010.



**Figura IV.18. Color aparente del agua potable de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.**

Es importante destacar que la norma establece los límites de este parámetro como color verdadero (después de filtrar la muestra). Siendo el valor máximo aceptable para el agua tratada de 15 UCV y el valor deseable menor a 5 UCV. Esto significa que solo es válido comparar el color aparente con la normativa cuando sus valores están por debajo de 15 UCV pues siendo mayor no hay garantía que el color verdadero cumpla con los requerimientos. Como se puede observar en la figura IV.18 en muchos casos los valores máximos del color aparente superan los 15 UCV, siendo los casos más resaltantes los meses de noviembre de 2008 y octubre de 2009. Sin embargo, se observa que la mayoría de los valores promedios se encuentran por

debajo de 15 UCV. Esto permite deducir que el promedio de los valores de color aparente se encuentran inferiores a lo que establece la normativa.

La figura IV.19 refleja los valores reportados para el pH del agua tratada de la planta de tratamiento Pie de Cerro para los años 2008, 2009 y 2010.

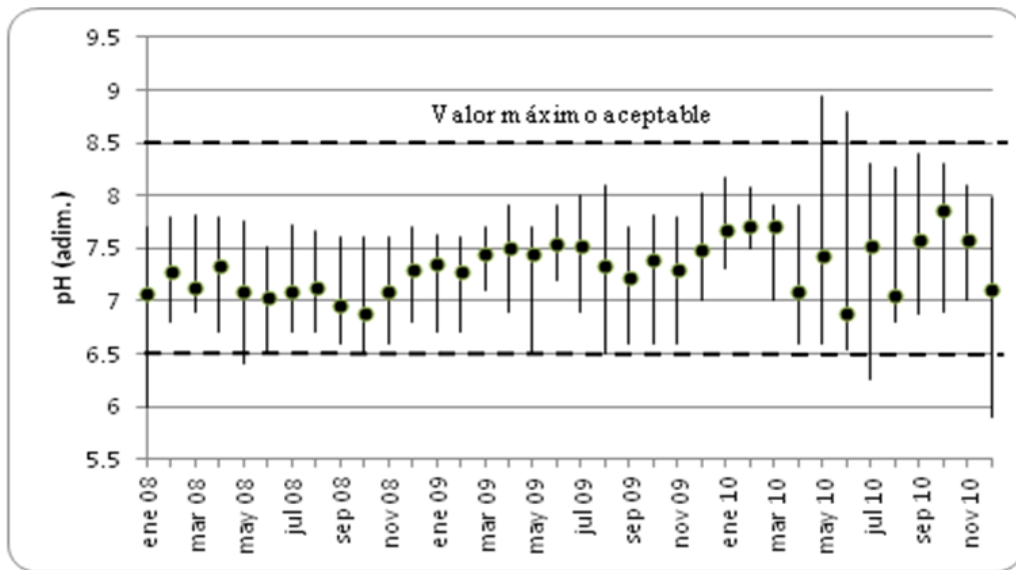
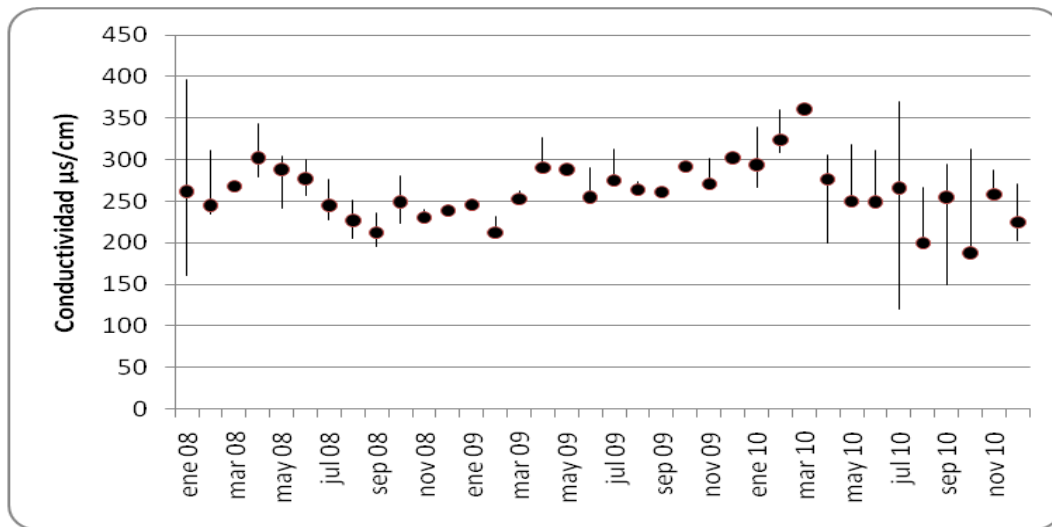


Figura IV.19. pH del agua potable de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.

La figura IV.19 muestra para cada año que los valores promedios de pH oscilan entre 6,5 y 8,5. Esto coincide con los valores de pH deseables establecidos para el agua potable según la norma de calidad del agua. Adicionalmente, la alcalinidad del agua cruda parece adecuada, ya que no se modifica sustancialmente el pH con la dosificación de sustancias químicas a pesar de que en el proceso de tratamiento no añaden cal. Nuevamente se evidencia el cambio de equipo en el 2010.

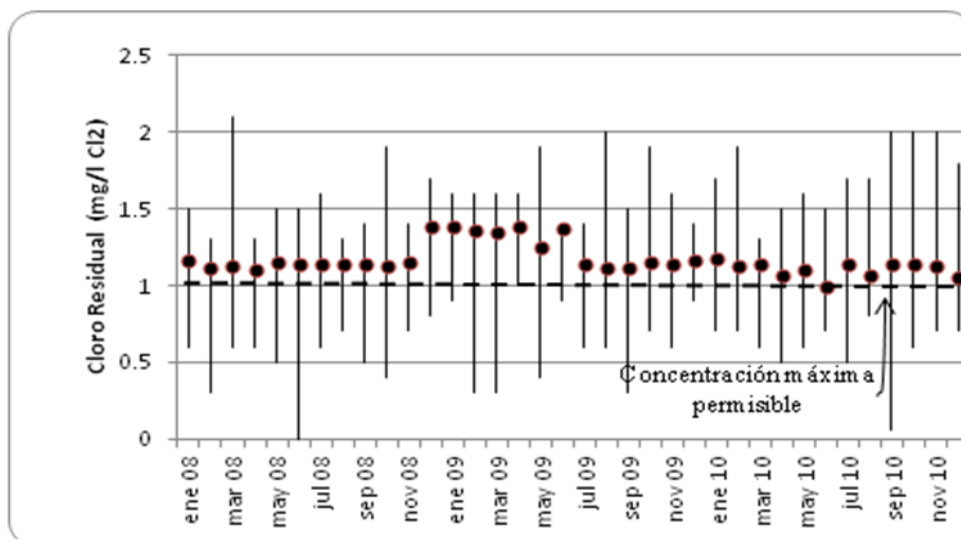
La figura IV.20 representa los valores de conductividad del agua tratada de la planta de tratamiento Pie de Cerro para los años 2008, 2009 y 2010.



**Figura IV.20 Conductividad específica del agua tratada de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.**

Como se puede observar, los valores máximos de conductividad (figura IV.20) del agua potable no superan los 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y este resultado al asociarlo con los sólidos disueltos permite estimar que la concentración de los mismos es relativamente baja. Se evidencia el cambio del equipo en el 2010.

La figura IV.21 presenta los valores reportados para el cloro residual del agua tratada de la planta de tratamiento Pie de Cerro para los años 2008, 2009 y 2010.



**Figura IV.21. Cloro residual del agua potable de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.**

El agua potable que se distribuye a una población debe contener una concentración máxima de cloro residual a la salida de la planta de 1 mg/l según la norma de calidad del agua. Este parámetro es muy importante, ya que está asociado al mantenimiento de su condición a lo largo de la red. Como se puede ver en la figura IV.21, los valores promedio de cloro residual se mantienen aproximadamente constantes, en la mayoría de los casos sobrepasan el valor normativo y en ocasiones los valores puntuales alcanzan concentraciones hasta de 2 mg/l. Ello podría justificarse por la inexistencia de estaciones recloradoras que garanticen la presencia de cloro residual libre a lo largo de toda la red de distribución, para proteger el agua ante intrusiones de agua no potables.

### Consumo de sustancias químicas

La figura IV.22 relaciona la turbiedad promedio del agua cruda con el consumo de sulfato de aluminio.

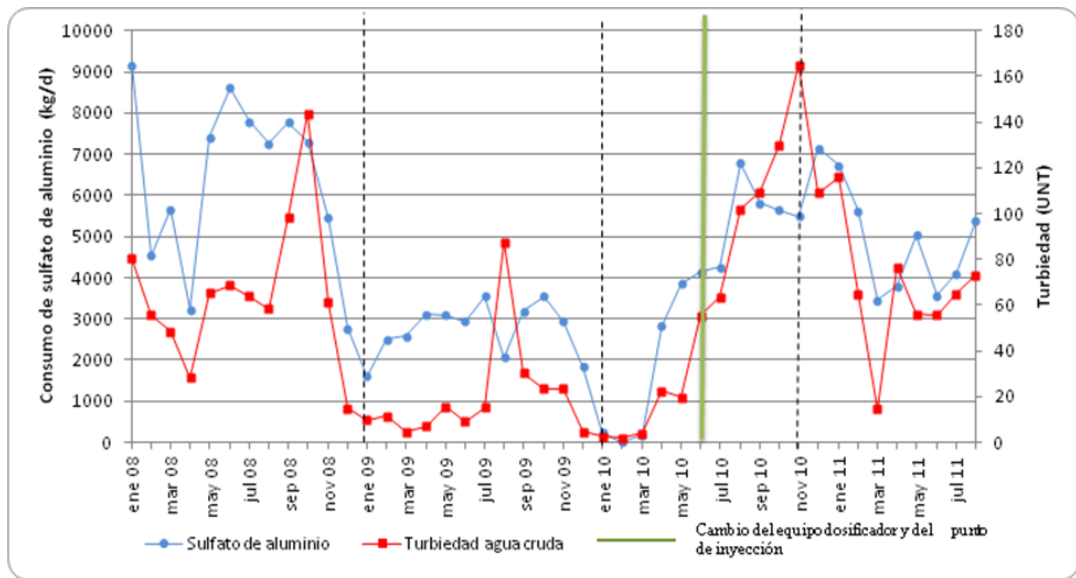


Figura IV.22. Consumo de sulfato de aluminio y turbiedad del agua cruda en función del tiempo de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.

En la figura IV.22, se puede observar que el mayor consumo de sulfato de aluminio fue en el año 2008, como se mencionó anteriormente durante este año se registraron en muchas ocasiones elevados valores de turbiedad en el agua cruda.

El 2009 fue un año de sequía, lo cual justifica la disminución en el consumo de sulfato de aluminio y según el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMEH, las precipitaciones en el 2010 superaron los valores normales con respecto a años anteriores (ver apéndice B) de manera que se presentan valores elevados de turbiedad, por lo que se observa que el consumo de sulfato de aluminio fue elevado, pero no mayor al del 2008, sobretodo a partir del mes de julio de 2010, que es cuando comienza el período de lluvia y la turbiedad del agua cruda y el color aparente son más elevados.

Este resultado posiblemente se deba a que para el año 2008, la dosificación de sulfato de aluminio se realizaba por carga aplicada en la superficie del agua en la unidad modular. Este proceso no es totalmente efectivo, ya que el operario descuida el llenado del tanque donde se prepara la solución a dosificar y además no hay una buena mezcla del coagulante con el agua. Este problema se solventó al momento de instalar un equipo dosificador en seco volumétrico, a finales del mes de junio de 2010, el cual hace más precisa la dosificación de sustancia química.

Adicionalmente esto trajo consigo el cambio del punto de dosificación, el cual era llevado a cabo por gravedad en la unidad de mezcla lenta, a una zona de mayor turbulencia (tubería matriz), generando una mezcla más eficiente y tal como estuvo concebido originalmente en la dosificación de sulfato de aluminio en la planta.

Es por ello que a pesar de que los niveles de turbiedad para el 2010 fueron significativos y comparables a los del 2008, el consumo de sulfato de aluminio disminuyó en un 16% con respecto al consumo en el 2008. Por lo tanto se puede evidenciar que existe un ahorro en la cantidad de sulfato empleado, posiblemente por este cambio en el punto de dosificación.

Es importante destacar que esta fue una de las modificaciones en las que se había insistido en las visitas previas a esta planta de tratamiento y se llevó a cabo

durante la realización de este trabajo especial de grado, constituyendo una de las posibilidades de mejoras ejecutadas durante la realización del mismo.

### **1.3 Determinación de los parámetros de diseño y su desviación con respecto a los valores obtenidos a partir del caudal de operación actual.**

Esta planta de tratamiento tiene un comportamiento completamente hidráulico, y aunque existen parámetros de referencia, se debe tomar en cuenta que cada planta opera de manera diferente dependiendo de las condiciones de la misma y de la forma en que ésta es operada. Sin embargo, estos parámetros se pueden tomar como guía, ya que no se dispone de planos de diseño, ni valores de referencia de esta planta.

Las siguientes tablas contienen los parámetros característicos calculados con el caudal de diseño, el máximo, el mínimo y el más frecuente para cada una de las unidades que conforman la planta de tratamiento de Pie de Cerro.

La tabla IV.1 contiene los parámetros del desarenador del río Curtidor y del río Gabante, donde se puede observar que el tiempo de retención teórico es superior al recomendado, lo que era de esperarse debido a que los caudales de operación son inferiores a los que debieron ser utilizados para el diseño, de acuerdo a la información verbal recibida. De cualquier manera, la mayor capacidad tiene la posibilidad de compensar la alta variabilidad de las características del agua cuando se presentan las lluvias torrenciales.

La tasa de desbordamiento superficial se encuentra hacia el límite inferior del rango recomendado. En cuanto a las velocidades, se observa que tanto el valor de la velocidad horizontal como el de la velocidad de resuspensión en ambos desarenadores están dentro de los parámetros recomendados y que además, la velocidad horizontal es menor a la velocidad de resuspensión, que es lo que se espera, ya que se garantiza que las arenas sedimenten.

**Tabla IV.1 Parámetros del desarenador del río Curtidor (C) y del río Gabante (Gb).**

	Caudal (Q) [l/s]		Tiempo de retención teórico ( $\Theta_t$ ) [min]		TDS [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *día]		Velocidad Horizontal ( $v_h$ ) [m/s]		Velocidad de resuspensión ( $v_{res}$ ) [m/s]	
	C	Gb	C	Gb	C	Gb	C	Gb	C	Gb
<b>Caudal diseño</b>	113	37	5	10	269	296	0,03	0,02	0,12	0,13
<b>Caudal máximo</b>	98	32	6	11	233	256	0,03	0,01	0,12	0,12
<b>Caudal mínimo o frecuente</b>	90	30	6	12	215	237	0,03	0,01	0,12	0,12
<b>Recomendación (Arboleda, 2000 y Arocha, 2011)</b>			1,5-4		200-420		½ a ¼ de $v_{res}$		-	

C: Curtidor; Gb: Gabante

Los decantadores rectangulares normalmente tienen una relación largo/ancho comprendida entre 3 y 6 (Arocha,2011), el desarenador del río Curtidor y del río Gabante tienen una relación largo/ancho de 5 y 7 respectivamente, lo que permite afirmar que ambos son capaces de remover las arenas contenidas en los ríos Gabante y Curtidor.

En la tabla IV.2 se destacan los parámetros de diseño para la unidad de mezcla rápida. Es importante destacar que debido a la configuración de esta planta y a la ubicación del punto de inyección del coagulante, la mezcla rápida se puede considerar que se realiza en la tubería y en el primer cilindro concéntrico de la unidad compacta.

**Tabla IV.2 Parámetros para la unidad de mezcla rápida de la P.T Pie de Cerro.**

	Caudal (Q) [l/s]	Mezcla rápida en:	Tiempo de retención teórico ( $\Theta_t$ ) [min]	Gradiente de velocidad (G) (s <sup>-1</sup> )
<b>Caudal Diseño</b>	150	Tubería	0,15	800
		Cilindro	1,00	194
<b>Caudal máximo</b>	130	Tubería	0,18	653
		Cilindro	1,19	157
<b>Caudal frecuente</b>	120	Tubería	0,19	579
		Cilindro	1,25	139
<b>Caudal mínimo</b>	90	Tubería	0,26	376
		Cilindro	1,67	90
<b>Recomendación (Arboleda, 2000)</b>			0,5 – 1	400 – 800

Estos resultados permiten afirmar que para el caudal mínimo (90 l/s) los valores de gradiente de velocidad y tiempo de retención en la tubería y en el cilindro no se ajustan a los valores de referencia, lo que limita la efectividad del proceso de coagulación. Sin embargo para el resto de los caudales, especialmente el más frecuente (120 l/s), si bien no se ajustan estrictamente a los valores recomendados, pareciera haber una compensación, ya que los gradientes de velocidad en la tubería son adecuados, pero con tiempos de retención menores, mientras que el cilindro operaría como una especie de transición hacia la etapa de mezcla lenta, lo que podría favorecer el proceso. La literatura también hace referencia a que el tiempo requerido para la desestabilización de las partículas es casi instantáneo.

Quizá esta combinación de efecto tubería-cilindro, aunque por separado, no presenten los valores recomendados en la literatura, propicie una mezcla suficiente de los coagulantes, lo cual se podrá verificar posteriormente cuando se analicen los resultados obtenidos en las pruebas de jarro simulando las condiciones de la planta.

A continuación se presenta en la tabla IV.3 los parámetros de diseño de la unidad de floculación, donde se puede observar que el gradiente de velocidad medido en los codos se encuentra entre los valores de referencia, esto quiere decir que la intensidad de la mezcla es apropiada y favorece el tamaño, la estabilidad y la formación adecuada de los flóculos. Sin embargo esta unidad no debe operar a caudales mayores al de diseño (150 l/s) puesto que al aumentar la velocidad de agitación se desfavorece el proceso de floculación.

**Tabla IV.3 Parámetros para la unidad de mezcla lenta de la P.T Pie de Cerro.**

	<b>Caudal (Q) [l/s]</b>	<b>Tiempo de Retención Teórico (<math>\Theta_t</math>) [min]</b>	<b>Gradiente de velocidad (G) [s<sup>-1</sup>] (codos)</b>
<b>Caudal diseño</b>	150	12	86
<b>Caudal máximo</b>	130	13	69
<b>Caudal frecuente</b>	120	14	61
<b>Caudal mínimo</b>	90	19	40
<b>Recomendación (Romero, 1990)</b>		10 – 60	20 – 100

Al igual que en el caso de la mezcla rápida, el caudal más frecuente con que opera la planta (120 l/s) pareciera producir unas condiciones adecuadas para la formación de los flóculos, ya que el gradiente y tiempo de retención para este caudal resultan favorable para esta mezcla lenta.

La tabla IV.4 resume los parámetros del sedimentador. En esta tabla se observa que los valores teóricos de todos los parámetros de diseño obtenidos para los diferentes caudales, se encuentran entre los rangos permisibles por la literatura, hecho que podría indicar un buen funcionamiento del sedimentador, sin embargo al ser de sección cuadrada podría traer como consecuencia fallas en su comportamiento hidráulico, tal como se reenfocherà con el ensayo de trazadores.

Vale destacar que cuando se está en presencia de instalaciones pequeñas con operación precaria se recomiendan tasas de desbordamiento superficial entre 20 y 30  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-d}$ , y que entre 40 y 60  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-d}$  generalmente están asociadas a instalaciones con nuevas tecnología y uso de ayudantes de coagulación, razón por la cual este parámetro en esta planta puede considerarse relativamente alto, lo que condiciona que debería producirse un buen flóculo con excelentes propiedades de sedimentación.

**Tabla IV.4 Parámetros para el sedimentador de la P.T Pie de Cerro.**

	<b>Caudal (Q)</b> [L/s]	<b>Tiempo de Retención Teórico (<math>\Theta_t</math>) [h]</b>	<b>TDS</b> [ $\text{m}^3/\text{m}^2\text{*d}$ ]	<b><math>v_{\text{ent}}</math></b> [cm/s]	<b>CUV</b> [ $\text{m}^3/(\text{m}_{\text{vert}}\text{*h})$ ]
<b>Caudal diseño</b>	150	2,0	60	4,1	8,0
<b>Caudal máximo</b>	130	2,4	52	3,5	7,0
<b>Caudal frecuente</b>	120	2,6	48	3,2	6,0
<b>Caudal mínimo</b>	90	3,5	36	2,4	5,0
<b>Recomendación (Arboleda, 2000)</b>		2-6	20 – 60	< 15	6-12

TDS: tasa de desbordamiento superficial,  $v_{\text{ent}}$ : velocidad de entrada al sedimentador, CUV: carga unitaria de vertedero.

Nuevamente pareciera que los parámetros calculados con el caudal más frecuente con el que opera la planta (120 l/s) son los más adecuados para que se realice una buena sedimentación, a pesar de que la tasa de desbordamiento superficial pareciera alta, requiriendo un flóculo muy bien formado, razón por la cual

seguramente los altos valores de turbiedad del agua sedimentada se deba a estas tasas de desbordamiento superficial cercanas a los  $50 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ .

La tabla IV.5 contiene los parámetros de diseño de los filtros de la planta de tratamiento de Pie de Cerro. Antes de realizar el análisis de los resultados, cabe mencionar que actualmente un filtro se encuentra fuera de funcionamiento, por lo que el cálculo de los parámetros trabajando los cuatro filtros sólo se realizó para el caudal de diseño.

**Tabla IV.5 Parámetros para los filtros de la P.T Pie de Cerro.**

	<b>Caudal (Q) [l/s]</b>	<b>N° de filtros Trabajando</b>	<b>Velocidad de filtración (V<sub>f</sub>) [m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/ d]</b>
<b>Caudal Diseño</b>	150	4	231
		3	308
		2	462
<b>Caudal máximo</b>	130	3	266
		2	400
<b>Caudal frecuente</b>	120	3	246
		2	369
<b>Caudal mínimo</b>	90	3	184
		2	277
<b>Recomendación (Arboleda,2000)</b>		6-4	230-600

Se puede observar como la velocidad de filtración varía según la cantidad de filtros que estén en operación y que sus valores se encuentran dentro del rango establecido por la literatura. Cabe mencionar que cuando el caudal es el mínimo de operación, la velocidad de filtración es muy baja debido a que la cantidad de agua que entra a los filtros no es la suficiente si se opera con los tres filtros, por lo que es recomendable utilizar solo dos filtros. No obstante al operar con el caudal más frecuente se tienen velocidades de filtración apropiadas y dentro del rango establecido.

En la figura IV.23 se observan los tres filtros operando simultáneamente con el mínimo caudal, se puede notar que el volumen de agua no es suficiente para poner en funcionamiento toda la batería de filtros, ya que en el último filtro el agua no alcanza el nivel necesario para realizar el proceso de filtración. Cuando se presente

esta situación se podría poner en funcionamiento solo dos (2) filtros para ayudar a la conservación del material filtrante, evitando el choque continuo del agua con el lecho.



Figura IV.23. Filtros de la planta de tratamiento Pie de Cerro operando con mínimo caudal.

La carrera de filtración que se estableció en la planta de tratamiento de Pie de Cerro es de 9 horas, sin embargo la literatura recomienda que en una batería de filtros que funcione correctamente, la duración de las carreras de filtración puede variar entre 30 y 50 horas o más, dependiendo de la calidad del agua coagulada o decantada que reciba <sup>(10)</sup>. Sin embargo otros autores opinan que la carrera de filtración no debe superar las 24 horas para evitar el recrecimiento bacteriano <sup>(11)</sup>.

A continuación la tabla IV.6 muestra los parámetros para el dosificador de sustancias químicas elaborado por medio de pruebas realizadas para la obtención de los diferentes parámetros que caracterizan este equipo.

Tabla IV.6 Parámetros para el dosificador de sulfato de aluminio de la P.T Pie de Cerro.

<b>Caudal de alimentación (l/s)</b>	1,7	
<b>Rango de dosificación del equipo (g/min)</b>	40-1020	
<b>Tiempo de retención del tanque de disolución (min)</b>	2,0	
<b>Dimensiones del tanque de mezcla</b>	<b>Diámetro (m)</b>	0,6
	<b>Profundidad (m)</b>	0,72

El equipo dosificador de sulfato de aluminio tiene un amplio rango de dosificación de coagulante, ya que puede operar en condiciones mínimas cuando la turbiedad del agua cruda oscila entre los 20 UNT y máximas cuando la turbiedad

supera los 100 UNT lo cual se determinó en las pruebas de jarros realizadas. Por otro lado diversos autores recomiendan períodos de retención de la solución mayores de 5 ó 10 minutos para permitir la polimerización adecuada de los coagulantes y mejorar su eficiencia. Sin embargo el tiempo de retención real del tanque de disolución es de 2 min, el cual es menor al mínimo recomendable.

No se calculó la exactitud del dosificador debido a que en la planta de tratamiento no disponen de la curva de calibración del fabricante para compararla con la obtenida experimentalmente.

#### **1.4 Determinación del comportamiento hidráulico de las unidades.**

Para visualizar el funcionamiento hidráulico de las unidades de sedimentación y mezcla lenta de la planta de tratamiento de Pie de Cerro, se realizó la prueba de trazadores, cuyos resultados y análisis se presentan a continuación.

##### **Desarenador río Curtidor**

Para la planificación del ensayo se tomó como caudal teórico de entrada al desarenador 75 l/s, con este valor se obtuvo un tiempo de retención teórico de 8 minutos. Sin embargo al momento de realizar el ensayo se midió el caudal a la salida del desarenador, con un caudalímetro portátil que reportó un valor de 89 l/s con lo cual se obtiene un tiempo de retención teórico de 6 minutos. Este valor de caudal es razonable ya que al cerrar la entrada de uno de los desarenadores todo el caudal pasaba por el desarenador que estaba operativo.

Las figura IV. 24 muestra los resultados de la medición de la conductividad en el desarenador y la figura IV.25, corresponde a la curva C-t que representa la concentración equivalente en el tiempo, la misma se construyó utilizando la curva de calibración de esta unidad (ver apéndice C).

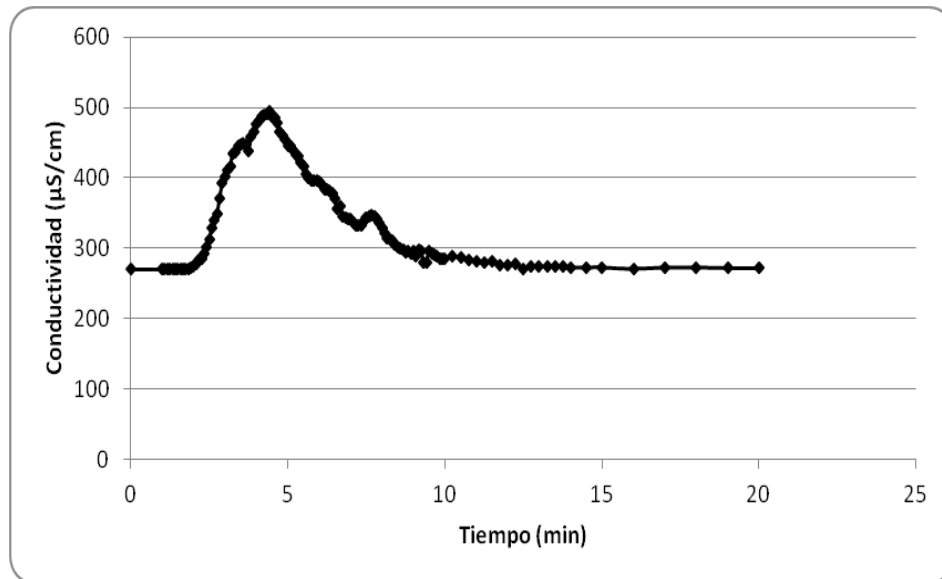


Figura IV.24. Curva de conductividad en función del tiempo en el desarenador del río Curtidor.

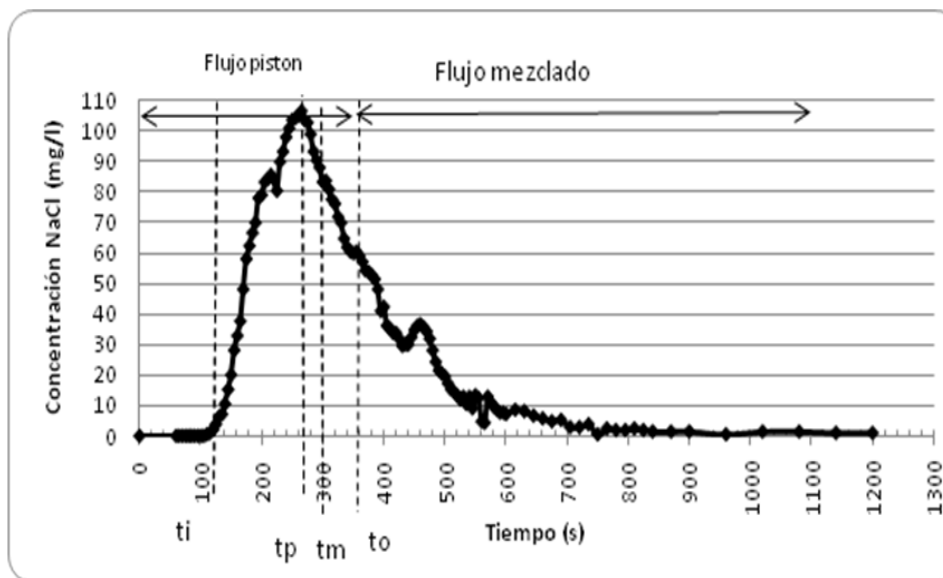


Figura IV.25. Curva C-t ajustada para el desarenador del río Curtidor.

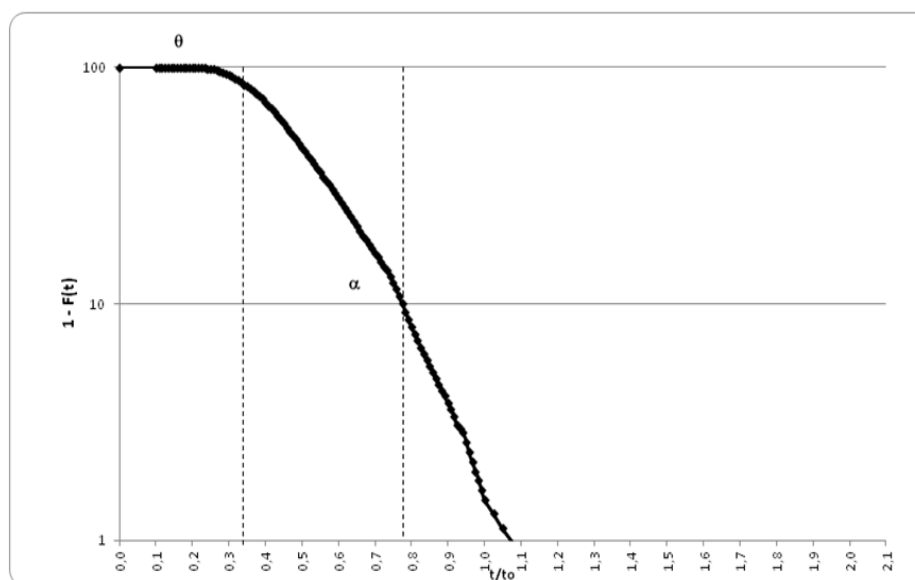
El tiempo de retención real obtenido es de 5 minutos, inferior al obtenido teóricamente (6 minutos), esto puede indicar la tendencia a pequeños cortocircuitos, además por la forma alargada de la curva se pudo evidenciar que la unidad presenta zonas muertas.

La tabla IV. 7 contiene los resultados obtenidos a partir de la curva C-t.

**Tabla IV.7 Resultados de la curva C para el desarenador del río Curtidor.**

PARÁMETROS	RESULTADOS
$t_i/t_o = 0,33$	No se presentan cortocircuitos grandes.
$t_m/t_o = 0,83$	Pudieran haber cortocircuitos.
$t_p/t_o = 0,75$	Tiende a flujo piston.
$e : ((t_r - t_p) - (t_p - t_i))/t_o = 1,3 > 2,3$	Presencia de flujo pistón.
IM: Índice de Morrill: $t_{90\%}/t_{10\%} = (10/4) = 2,5$	Baja dispersión.

Para confirmar los resultados obtenidos se construyó la curva F, presentada en la figura IV.26.



**Figura IV. 26. Curva F para la unidad del desarenador del río Curtidor.**

Los valores resultantes de su procesamiento se muestran en la tabla IV.8, se confirma el predominio de flujo pistón (63%) sobre el flujo mezclado (37%) lo cual es favorable para esta unidad de sedimentación y la presencia de espacios muertos (46%).

**Tabla IV. 8 Resultados del análisis de Curva F-desarenador río Curtidor.**

PARÁMETRO	RESULTADO
$\theta$	0,34
$tg\alpha$	2,3
Fracción de flujo pistón n (P)	0,63
Fracción de volumen muerto (M)	0,46
Fracción de flujo no pistón (1-p)	0,37

Del análisis hidráulico se puede concluir que el desarenador tiende a flujo pistón con un tiempo medio de retención de 5 minutos justificado por la poca presencia de espacios muertos apoyado por una relación largo/ancho de 5, indicando un buen funcionamiento de esta unidad.

### Unidad de floculación

El comportamiento hidráulico de la unidad de floculación se ven reflejadas en las figuras IV.27 y IV.28.

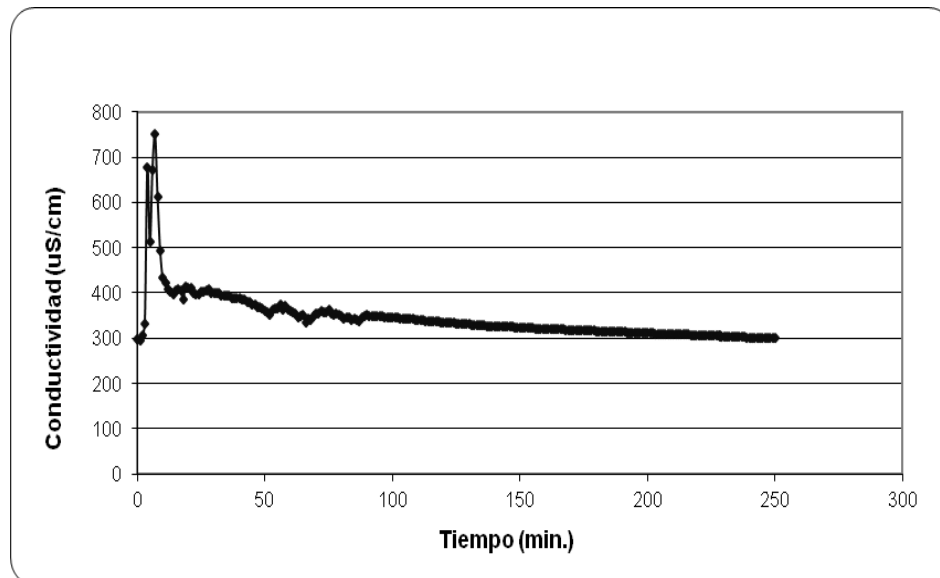


Figura IV.27 Curva de conductividad en función del tiempo de la unidad de mezcla lenta.

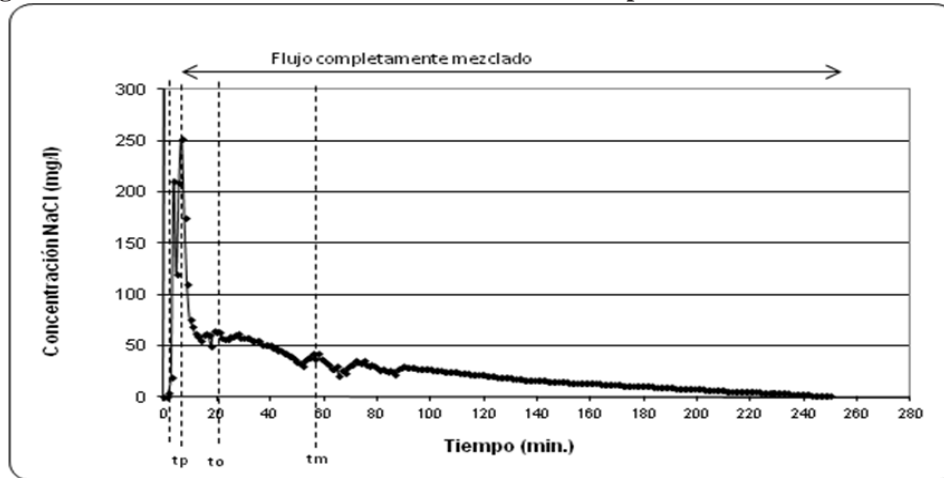


Figura IV.28 Curva C-t ajustada para la unidad de mezcla lenta – determinación de parámetros.

En la curva C-t (figura IV.28) se puede apreciar que en el floculador existe un predominio del flujo mezclado. El tiempo de retención real determinado en esta unidad fue de 57 minutos, muy superior al teórico el cual es de 20 minutos, esto puede deberse a la presencia de zonas muertas apreciables ocasionadas por la presencia de lodos en el fondo del floculador. Esta situación se verificó cuando se le realizó mantenimiento a la unidad, ya que en la forma cónica que tiene la base de la misma se observaba acumulación de lodos. Otro factor que se debe considerar es el hecho de que la unidad compacta esté un poco inclinada esto afecta los resultados obtenidos pues el flujo de agua se orientará en el sentido de dicha inclinación, contribuyendo a un aumento del tiempo de retención.

Los valores resultantes de la curva C-t se presentan en la tabla IV.9.

Tabla IV.9 Resultados de la curva C-t para la unidad de floculación.

PARÁMETRO	RESULTADO
$t_i/t_o = 0,1$	Existencia de cortocircuitos hidráulicos
$t_m/t_o = 2,85$	Presencia de zonas muertas
$t_p/t_o = 0,35$	Predominio de flujo mezclado
$e : ((t_f - t_p) - (t_p - t_i))/t_o = 13,4$	Predominio de flujo mezclado
IM: $t_{90\%}/t_{10\%} = 24,6$	Alta dispersión

La figura IV.29, presenta la curva F para la unidad de mezcla lenta.

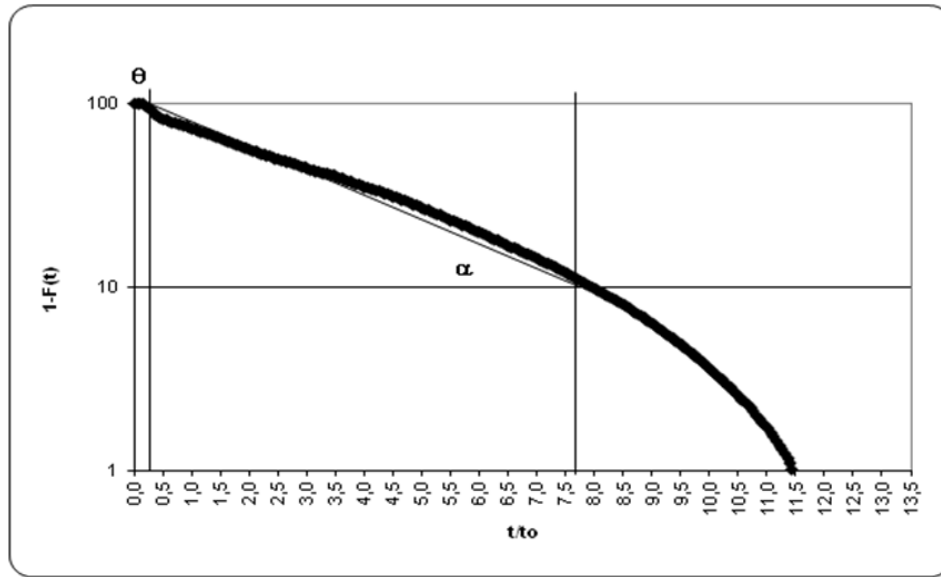


Figura IV. 29 Curva F para la unidad de mezcla lenta.

La tabla IV.10 muestra los resultados obtenidos a partir de la curva F, se puede verificar la presencia de flujo mezclado (91%). Aunque el valor de M es negativo no se puede descartar la existencia de espacios muertos ni zonas estancadas, ya que debido a las fallas presentadas por el conductímetro se pudo haber perdido la información necesaria que reportara su existencia.

Tabla IV.10 Resultados del análisis de Curva F-unidad de mezcla lenta.

PARÁMETRO	RESULTADO
$\theta$	0,3
$tg\alpha$	0,14
Fracción de flujo pistón (P)	0,09
Fracción de volumen muerto (M)	- 2,48
Fracción de flujo no pistón (1-p)	0,91

Finalmente se tiene que el floculador presenta flujo mezclado con un tiempo de retención de 57 minutos evidenciado por la presencia de espacios muertos, aunque

esto no se ve reflejado en el valor de M. Por esta razón, se sugiere repetir este ensayo utilizando una solución salina con una concentración apropiada para esta unidad, pues la usada contenía una concentración mucho mayor a la que correspondía al volumen del floculador, además que el conductímetro utilizado presentó fallas durante la realización del ensayo, lo que posiblemente ocasionó estas inconsistencias en los resultados obtenidos.

### Unidad de sedimentación

Las figuras IV. 30 y IV.31 muestran los resultados de la medición de la conductividad en la unidad de sedimentación y la concentración equivalente en el tiempo.

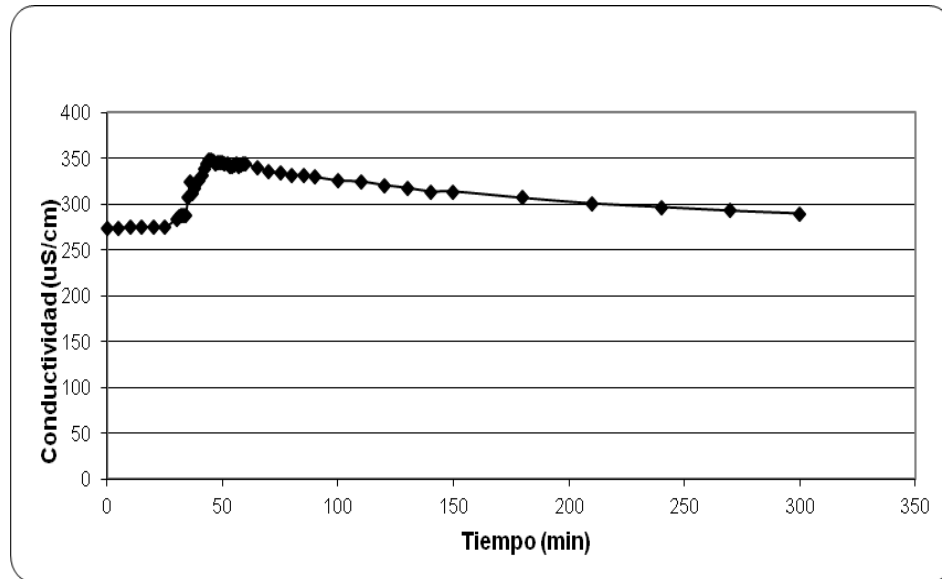


Figura IV.30. Curva de conductividad en función del tiempo en el sedimentador.

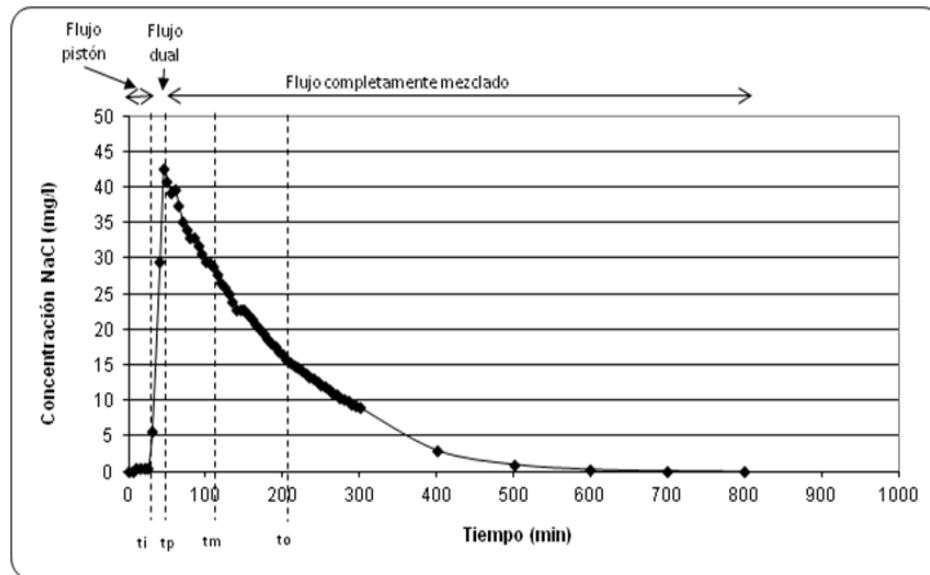


Figura IV.31. Curva C-t ajustada para el sedimentador– Determinación de parámetros.

En la curva C-t (figura IV.31) se puede observar que la tendencia de la curva es típica de un flujo completamente de mezclado, lo cual es totalmente contrario a lo deseado para un sedimentador, puesto que los flóculos no se están sedimentando, trayendo como consecuencia una sobre carga en el proceso posterior, el cual es la filtración, por el paso de los flóculos al mismo.

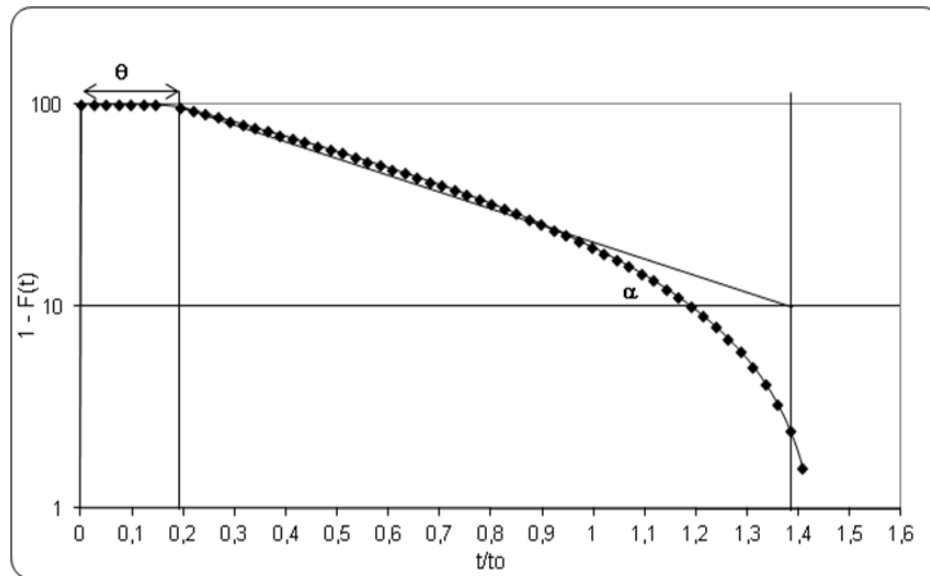
En cuanto al tiempo de retención real de la unidad de sedimentación, este es igual a 120 minutos, el cual resulta inferior al obtenido teóricamente (206 minutos), como ya se mencionó la unidad compacta de la planta tiene cierta inclinación, justamente la salida del agua del sedimentador hacia los filtros se encuentra del lado hacia donde está la inclinación, es allí donde se realizó la medición con el conductímetro, como la velocidad de salida se incrementa el tiempo de retención será menor al obtenido teóricamente. Este hecho contribuye a la existencia de cortocircuitos hidráulicos.

La tabla IV.11 muestra la interpretación de los resultados obtenidos en la curva C-t, de acuerdo a los criterios de análisis.

**Tabla IV.11 Resultados de la curva C-t para la unidad de sedimentación.**

PARÁMETROS	RESULTADOS
$t_i/t_o = 0,15$	Indica la existencia de cortocircuito hidraulico.
$t_m/t_o = 0,58$	Como la relación $t_m/t_o$ es menor a la unidad indica la presencia de espacios muertos.
$t_p/t_o = 0,22$	Predominio de flujo mezclado
$e : ((t_f - t_p) - (t_p - t_i))/t_o = 3,59$	Predominio de flujo mezclado
IM: $t_{90\%}/t_{10\%} = 5$	Alta dispersión

Seguidamente la figura IV.32, la cual representa la curva F del sedimentador, cuyos parámetros se resumen en la tabla IV. 12.



**Figura IV.32. Curva F del sedimentador.**

**Tabla IV.12 Resultados del análisis de Curva F-sedimentador.**

PARÁMETRO	RESULTADO
$\theta$	0,20
$\text{tg } \alpha$	1,20
Fracción de flujo pistón (P)	0,28
Fracción de volumen muerto (M)	0,28
Fracción de flujo no pistón (1-p)	0,72

De los resultados obtenidos a partir de la curva F se puede corroborar lo observado en la curva C, donde la presencia de espacios muertos es del 28% y la existencia de flujo mezclado es de 72%.

La unidad de sedimentación tiene un flujo que tiende a flujo mezclado, un tiempo de retención de 120 minutos y presencia de cortocircuitos y zonas muertas, además de una relación largo/ancho de 1. Las características presentes en el sedimentador confirman la inconveniencia del uso de unidades de sedimentación de sección cuadrada.

Es importante recalcar que la concentración de sal utilizada para cada ensayo no supera la concentración máxima de cloruro permitida por la norma de calidad del agua la cual es de 300 mg/l, lo cual se puede confirmar al observar las gráficas de concentración de sal, en el ensayo de trazadores realizado a la salida del desarenador del río Curtidor se obtuvo una concentración máxima de cloruro de aproximadamente 110 mg/l (ver figura IV.25), en el floculador fue de 250 mg/l (ver figura IV.28) y en el sedimentador de 44 mg/l (ver figura IV.31), lo que significa que al llegar al consumidor esta concentración será mucho menor.

### **1.5 Observación de las prácticas operacionales**

En la planta de tratamiento de Pie de Cerro, laboran cuatro (4) operadores y dos (2) ayudantes, los mismos realizan las actividades que se mencionan en la tabla IV.13, la cual se construyó luego de observar diariamente a cada uno de los operadores en su jornada de trabajo.

**Tabla IV.13 Prácticas operacionales**

<b>¿CÓMO SE HACE?</b>	<b>¿CÓMO DEBERÍA HACERSE?</b>
<p>Cada hora se miden todos los parámetros de calidad del agua cruda, sedimentada y filtrada, tales como: temperatura, turbiedad, color aparente, pH, conductividad, además se reporta el caudal de entrada y se verifica la dosis de cloro añadido en la pre y post-cloración.</p>	<p>Adicionalmente se debe determinar la alcalinidad y el aluminio residual, estos parámetros son importantes en la evaluación del tratamiento. Considerando la variabilidad del afluente se debe observar algún cambio en las características físicas del agua en cualquier instante, medir los respectivos parámetros y reportarlos. Los análisis bacteriológicos son de vital importancia para asegurar la calidad del agua.</p>
<p>Se realiza una prueba de jarros diaria generalmente al inicio de la jornada laboral.</p>	<p>El cambio que más afecta la operación de la planta es el aumento de turbiedad. Al observar un cambio brusco en este parámetro se debe revisar el caudal, ajustar la dosis con la información de la curva de calibración y el funcionamiento de la planta en general. Luego se efectúa la prueba de jarros y se afina el ajuste del dosificador.</p>
<p>Limpieza del tanque dosificador cuando se observa que hay mucho sulfato de aluminio adherido a las paredes del tanque y las tuberías.</p>	<p>Dentro de la planificación de limpieza y mantenimiento de las unidades se debe incluir el mantenimiento de los equipos existentes en la planta de tratamiento.</p>
<p>Se realiza limpieza y mantenimiento de la unidad de mezcla rápida, mezcla lenta y sedimentación, desarenadores y zona de entrada de los filtros sólo cuando se considera necesario. Tomando como referencia la última vez que se lavó la unidad.</p>	<p>El supervisor debe llevar un registro de las actividades de mantenimiento que se realizan a cada una de las unidades. Estas actividades deben ser programadas tomando en cuenta los períodos de sequía y lluvia. La bibliografía recomienda establecer un período de 3 meses para realizar limpieza y mantenimiento.</p>
<p>Al final de cada jornada laboral se calcula la cantidad de sulfato de aluminio utilizada en cada hora, esto se realiza dividiendo la cantidad total dosificada entre las 24 horas.</p>	<p>Aforar el equipo dosificador cada hora, para ello se debe tomar una muestra de sulfato de aluminio durante un minuto, pesarla y repetir el proceso 2 veces más, determinar el valor promedio, calcular efectivamente la cantidad a dosificar y ajustar el dosificador. Con esto se garantiza que la concentración en el agua sea la óptima.</p>
<p>Lavado de los filtros, se realiza tomando en cuenta el tiempo de llenado del tanque de lavado.</p>	<p>Lavar los filtros tomando en cuenta turbiedad efluente e instalar piezómetros que permitan determinar la pérdida de carga. Además cada seis meses obtener una muestra del medio filtrante y mandar hacer un análisis granulométrico. La comparación de estos resultados con los de pruebas anteriores permite diagnosticar el estado del medio filtrante. Medir las tasas de filtración y lavado, así como la expansión del lecho durante el lavado con el objetivo de detectar posibles fallas, al menos una vez al mes.</p>

## 2. Proposición de cambios en la operación de la planta que incidan en su mejoramiento.

### 2.1 Determinación de los parámetros operacionales

Para conocer la operación real de la planta de tratamiento se realizaron distintas pruebas y ensayos cuyos resultados se muestran a continuación:

#### Simulación del funcionamiento de la planta a través de la prueba de jarros

- *Prueba de jarros con las dosis aplicadas en planta*

Las figuras IV.33, IV.34 y IV. 35 representan los valores promedio de turbiedad, color y pH respectivamente, obtenidos para el agua sedimentada en las distintas pruebas de jarros realizadas con la dosis aplicada en la planta y su comparación con los valores obtenidos en la misma.

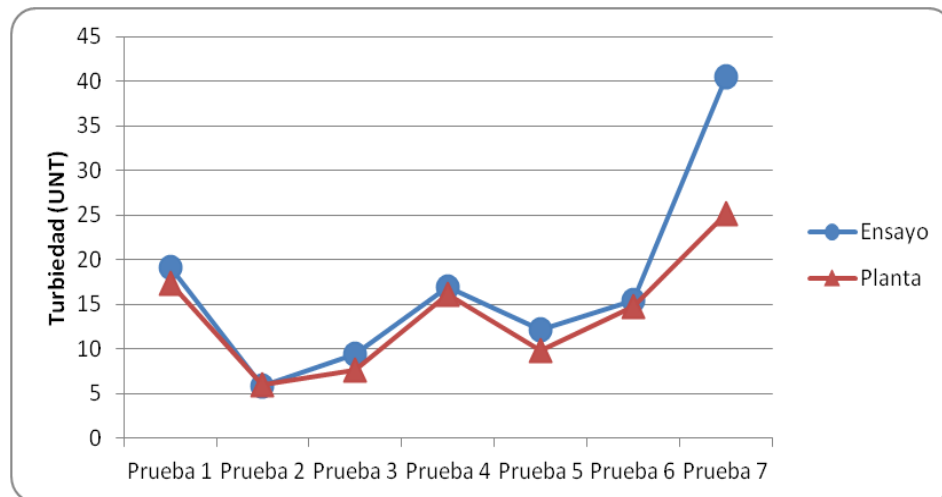
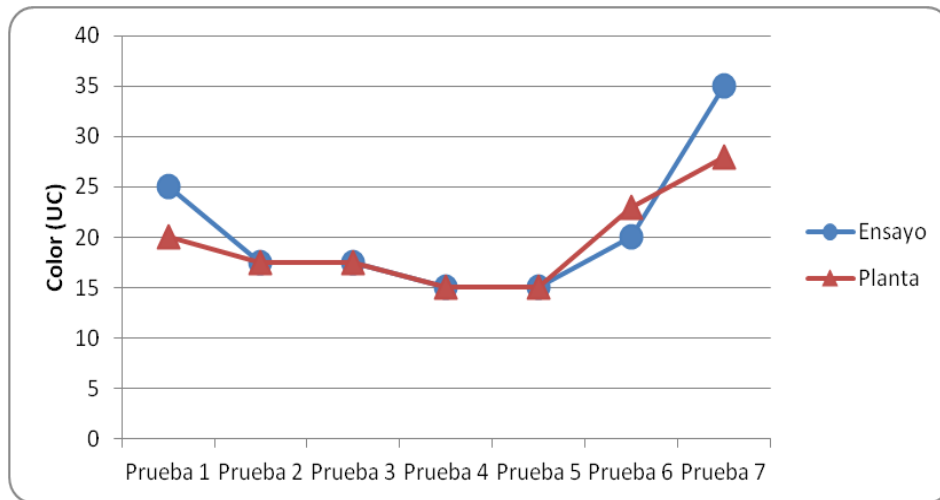
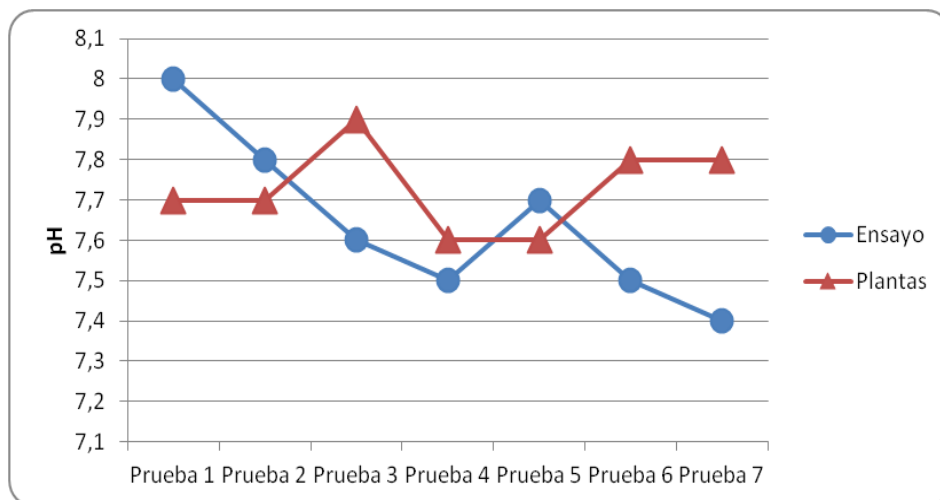


Figura IV.33. Turbiedad promedio del agua sedimentada en la planta de tratamiento de Pie de Cerro y en el ensayo de jarros.



**Figura IV.34. Color promedio del agua sedimentada en la planta de tratamiento de Pie de Cerro y en el ensayo de jarros.**



**Figura IV.35. pH promedio del agua sedimentada en la planta de tratamiento de Pie de Cerro y en el ensayo de jarros**

La adaptación de la prueba de jarros a la planta arrojó mejores resultados cuando se tuvo precisión en el caudal de entrada a la misma, es decir cuando el caudal fue medido con un medidor de caudal, como fue el caso de la prueba 2 y 6. A pesar que en la mayoría de las pruebas se utilizó una aproximación del caudal solo en la prueba 7 se detectaron diferencias en cuanto a los valores obtenidos en la planta debido a los cambios inesperados ocurridos en el agua cruda, que hizo que el operador modificara la dosis de coagulante durante la realización de este ensayo, lo cual incidió en los resultados.

Las diferencias entre el pH obtenido en la planta y el obtenido en las diferentes pruebas pudo deberse a que se utilizaron diferentes equipos para medir este parámetro; lo cual sugiere revisarlos y realizar una calibración adecuada que permita tener valores similares con ambos equipos.

Con esta experiencia se pudo demostrar que efectivamente calculando los gradientes de velocidad, tiempos de retención y tasa de desbordamiento superficial en la planta con el caudal de operación previamente medido y determinando las condiciones a utilizar en la prueba de jarros (rpm, tiempos de agitación y tiempo de captación de la muestra en la sedimentación) se obtiene una buena simulación del funcionamiento de la planta con la prueba de jarros, lo que permite poder determinar una dosis de coagulante en el laboratorio que pueda ser aplicada en planta para obtener buenos resultados en la calidad del agua con un uso correcto de las sustancias químicas.

- ***Prueba de jarros ajustada para determinar la dosis óptima a ser aplicada en planta***

Los resultados obtenidos en la prueba de jarros ajustada utilizando diferentes cantidades de sulfato de aluminio para determinar la dosis óptima se reflejan a continuación.

La tabla IV. 14 presenta las dosis de sulfato aplicadas en la planta, antes de realizar el ensayo de la prueba de jarros y el promedio de estas se utilizó para definir las diferentes dosis de coagulante aplicado en cada jarro. Como se puede observar existen pequeñas variaciones en cuanto a la concentración de sulfato en las distintas mediciones realizadas cada media hora.

**Tabla IV. 14 Dosis de sulfato aplicada en la planta antes y después de realizar la prueba de jarros.**

<b>Hora</b>	<b>Prueba 1 Dosis (mg/l)</b>	<b>Prueba 2 Dosis (mg/l)</b>	<b>Prueba 3 Dosis (mg/l)</b>	<b>Prueba 4 Dosis (mg/l)</b>
8:30	22,04	29,82	14,07	23,90
9:00	21,85	30,70	13,52	24,34
9:30	22,77	28,94	14,81	23,06
10:00	22,40	30,35	12,96	24,61
10:30	21,48	30,90	12,59	24,58
Promedio	22,11	30,14	13,59	24,09
11:30	22,00	21,00	14,00	9,00
12:00	23,10	19,52	14,10	9,06
01:00	22,91	21,24	14,57	10,11
01:30	22,61	21,13	15,11	9,68
02:00	23,66	20,89	14,48	9,70
02:30	24,00	21,14	13,97	10,23
03:00	23,22	20,50	14,11	9,96
03:30	22,53	20,57	14,2	9,83

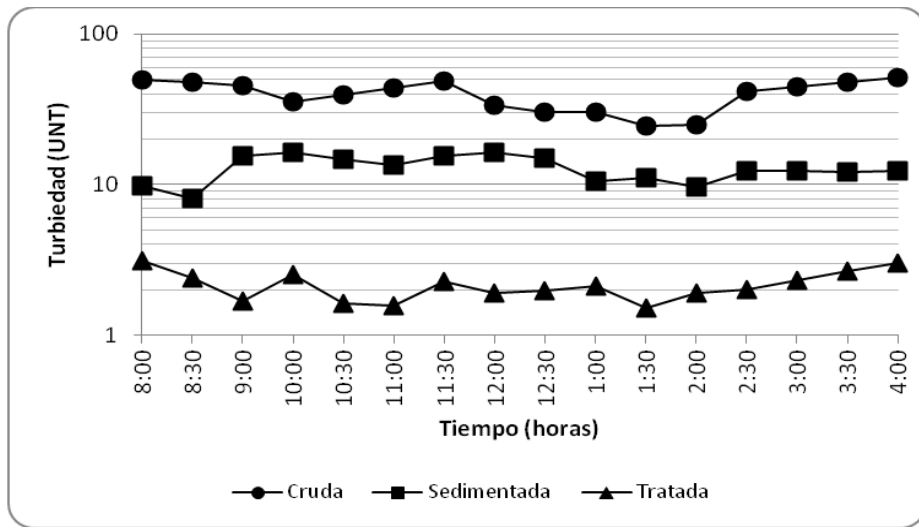
En la tabla IV.15 se presenta la dosis de sulfato aplicada en cada jarra para las pruebas 1 y 3, así como los resultados obtenidos. Vale destacar en estos dos ensayos no se midió el caudal de entrada, sino fue estimado según la rutina de los operadores.

**Tabla IV.15. Resultados de simulación de la prueba de jarros realizada en la planta de tratamiento de Pie de Cerro.**

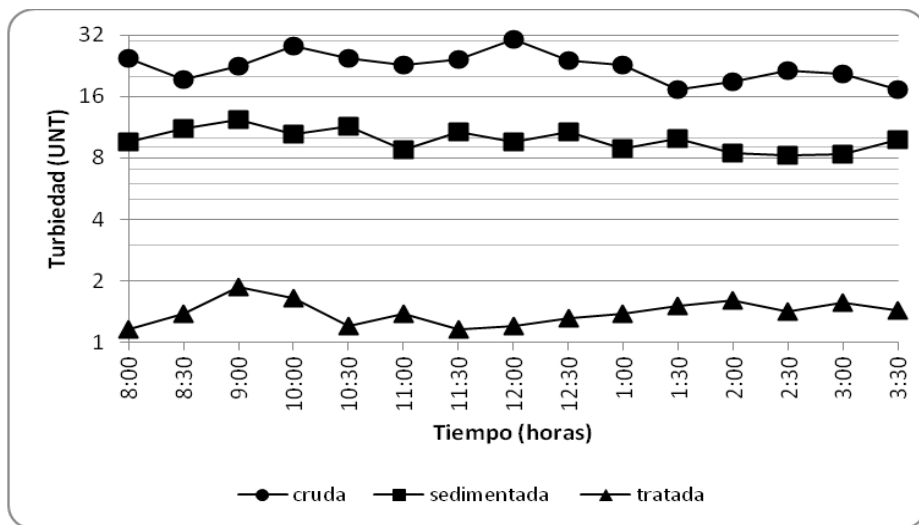
Parámetro	Prueba 1 (28-08-2011)							Prueba 3 (01-09-2011)						
	Agua Cruda	Jarro 1	Jarro 2	Jarro 3	Jarro 4	Jarro 5	Jarro 6	Agua Cruda	Jarro 1	Jarro 2	Jarro 3	Jarro 4	Jarro 5	Jarro 6
Dosis (mg/l)	-	9	12	22	34	46	62	-	9	11	14	17	23	28
Turbiedad (UNT)	48	36	25	7	9	12	19	28	11	12	5	9	8	11
Color (UC)	50	45	30	10	15	20	25	40	20	20	15	20	15	20
pH	7.98	7.72	7.76	7.78	7.78	7.78	7.68	7.96	7.78	7.86	7.88	7.87	7.83	7.78
Índice de Willcomb	-	A	B	F	E	D	D	-	C	C	D	D	D	C
WRA	-	0	0	6	4	4	4	-	4	4	6	6	6	4

Luego de realizar la prueba de jarros se observó que con la dosis de sulfato de aluminio aplicada en la planta (22 y 14 ml/l aproximadamente), los resultados fueron favorables para las condiciones presentes en ese momento, es por ello que se mantuvo la dosis. Cabe destacar que en el ensayo las turbiedades obtenidas fueron de 7 UNT en la prueba 1 y 5 UNT en la prueba 2, las turbiedades promedio del agua sedimentada medidas en la planta durante ese día son mayores a estas (13 y 10 UNT respectivamente), tal como se observa en la figura IV.36. Esta diferencia pudo deberse a un valor errado de caudal pues como ya se mencionó este no fue medido. El caudal es un factor determinante en este ensayo y una variación de este podría modificar completamente los resultados.

Se observa en la figura IV.36 (a y b) que la turbiedad del agua sedimentada experimentó pequeñas variaciones, al igual que el agua cruda. Asimismo se observa que la turbiedad del agua tratada estuvo entre 1 y 3 UNT.



(a)



(b)

Figura IV. 36 (a y b) Comportamiento de la turbiedad del agua cruda, sedimentada y tratada en la planta de tratamiento de Pie de Cerro durante el día que se realizaron las pruebas 1 y 3.

La tabla IV.16 contiene los resultados de los parámetros de calidad obtenidos en las pruebas de jarro 2 y 4.

**Tabla IV.16. Resultados de simulación de la prueba de jarros realizada en la planta de tratamiento de Pie de Cerro.**

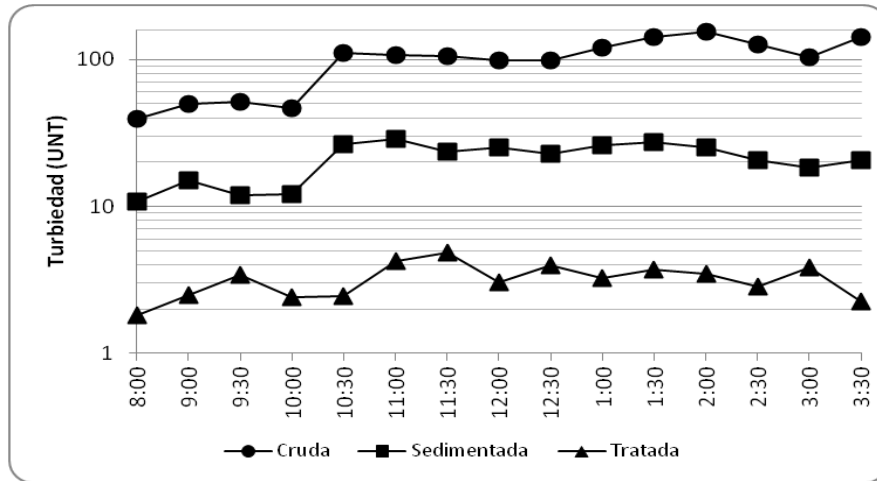
Parámetro	Prueba 2 (30-08-2011)							Prueba 4 (02-09-2011)						
	Agua Cruda	Jarro 1	Jarro 2	Jarro 3	Jarro 4	Jarro 5	Jarro 6	Agua Cruda	Jarro 1	Jarro 2	Jarro 3	Jarro 4	Jarro 5	Jarro 6
Dosis (mg/l)	-	9	13	17	21	27	30	-	9	11	13	18	22	24
Turbiedad (UNT)	105	75.1	60.1	32.1	20	71.3	26	23.6	7	7.49	9.04	10.5	7.21	12
Color (UC)	120	90	65	45	30	90	45	30	5	7.5	10	20	7.5	20
pH	7.91	8.17	8.12	8.06	8.01	7.94	7.86	8.12	7.73	7.77	7.78	7.77	7.72	7.69
Índice de Willcomb	-	A	A	C	D	C	D	-	D	D	C	C	D	C
WRA	-	0	0	4	6	4	4	-	4	2	4	2	4	2

En las pruebas 2 y 4 el caudal pudo ser medido antes de realizar el ensayo. Debido a que para dosis menores a las aplicadas en la planta se obtuvieron buenos resultados en la prueba de jarros, se modificó la cantidad de sulfato aluminio aplicado tal como se observa en la tabla IV.14, los resultados en ambas pruebas indican que con esas dosis aplicadas las turbiedades obtenidas en el ensayo (2 y 7 respectivamente) fueron las que se obtuvieron en planta después de las 11:30 am, hora en la cual se cambio la dosificación (ver figura IV.37).

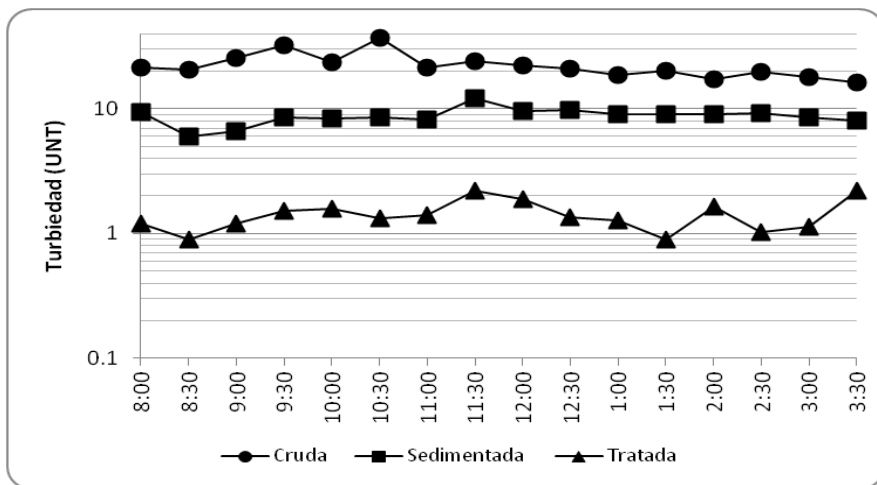
En la prueba 2 la turbiedad del agua cruda aumentó luego de realizado el ensayo como se puede apreciar en la figura IV.37 (c), sin embargo se puede notar que aunque se disminuyó la dosis de sulfato de aluminio de 30 a 21 mg/l la turbiedad del agua sedimentada y la de la filtrada se mantuvieron, aun dosificando 40 % menos de coagulante, lo cual se refleja en un ahorro de dicha sustancia.

En la prueba 4, la turbiedad del agua cruda comenzó a disminuir luego de realizado el ensayo (figura IV.37 (d)) y modificada la dosis de sulfato de aluminio de 24 a 9 mg/l, en este caso la turbiedad del agua sedimentada y tratada se mantuvo, no

obstante aunque se verifica una disminución en el consumo de sustancia química, debió realizarse otro ensayo para ajustar la dosis a las nuevas condiciones del agua cruda.



(c)



(d)

Figura IV. 37 (c y d) Comportamiento de la turbiedad del agua cruda, sedimentada y tratada en la planta de tratamiento de Pie de Cerro durante el día que se realizaron las pruebas 2 y 4.

Estos resultados indican que efectivamente ajustando los gradientes y tiempos de captación de la muestra en el ensayo de prueba de jarros a los que tiene la planta, la calidad del agua obtenida en la prueba de jarros es la que se espera tenga el agua tratada en la planta.

Con estos resultados se pudo verificar también dos de las situaciones que representan mayor cuidado para la calidad del agua potable en plantas de tratamiento de agua como lo son: las variaciones bruscas de calidad del agua cruda y las fallas de dosificación de coagulante. Este último se podría mejorar con un plan de calibración y mantenimiento preventivo de los equipos y unidades de tratamiento, tal como lo mencionan García y Tortolano en su trabajo. Así como ajustando las pruebas de jarros para que realmente simulen las condiciones que se tienen en la planta.

### **Parámetros operacionales calculados en las unidades de filtración de la planta de tratamiento de Pie de Cerro.**

La tabla IV.17 presente a continuación contiene los parámetros reales de operación de cada filtro y su valor recomendado por la literatura.

**Tabla IV.17 Parámetros operacionales de los filtros de la la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.**

Parámetro Operacional	Filtro				Recomendación (Arboleda, 2000 y CEPIS, 2005)
	N°1	N°2	N°3	N°4	
Tasa de filtración unidad limpia (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> / d)	-	151	247	288	230 – 600
Tasa de filtración unidad sucia (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> / d)	-	75	177	217	230 – 600
Caudal de unidad limpia (l/s)	-	25	40	47	---
Caudal de unidad sucia (l/s)	-	12	29	35	---
Tasa de lavado (m/min)	-	0,67	0,77	0,63	0,7 – 1,0
Espesor del lecho filtrante (m)	-	0,8	0,6	0,8	Arena (0,25-0,3) Antracita (0,45-0,5)
Expansión del lecho (%)	-	37,5	133	25	25 – 30
Tiempo efectivo de lavado (min)	-	5,5	5,0	6,0	10 – 15
Tamaño efectivo (mm)	-	0,6	0,4	0,5	Arena (0,5-0,6) Antracita (0,75-0,9)
Coefficiente de uniformidad	-	2,9	3,0	3,9	Arena (1,3-1,7) Antracita (1,7 >)

El estudio del proceso de filtración en una planta de tratamiento comprende principalmente el control del lavado y el análisis del medio filtrante, los cuales son

evaluados por medio de la turbiedad. En vista de que se está operando con tasa declinante, cada filtro presenta un caudal y tasa de filtración diferente. En cuanto al lavado, esto se realiza en orden consecutivo, por lo tanto presenta mayor caudal y velocidad el filtro que se lavó de último y el filtro que esté más sucio tendrá la menor velocidad y caudal en el proceso.

En general las tasas de filtración con el filtro sucio y limpio se encontraron por debajo del valor mínimo recomendado, y además se observó que durante la filtración el agua descendía lentamente aun cuando el filtro estuviese limpio. Al momento de realizar el estudio de la tasa de lavado se pudo notar que al igual que la tasa de filtración esta se encontraba por debajo o cercana al valor mínimo, debido a que el agua asciende con lentitud, sin embargo se producían vórtices en el material filtrante sobre todo en el filtro N°3, donde ocurría una mezcla del lecho con el agua de lavado provocando pérdida del mismo, esto explica los elevados valores obtenidos en la expansión del lecho para este filtro (133%).

Es importante mencionar que la capacidad del tanque de agua para el lavado ( $56 \text{ m}^3$ ) es lo que define la duración de esta operación y aunque la bibliografía recomienda que para que esta operación sea óptima se deben lavar los filtros por un tiempo de 10 a 15 min, esta debe adaptarse a las condiciones de la planta y por lo general se realizan en un tiempo no mayor a los 7 min.

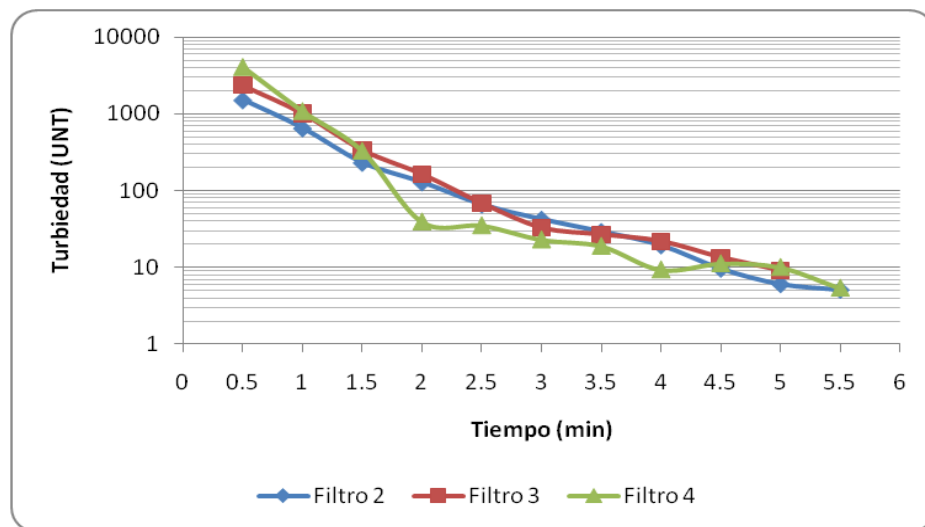
El volumen obtenido con el caudal de lavado y el tiempo de duración del lavado fue de 52 a  $54 \text{ m}^3$ , lo que indica que prácticamente se consume toda el agua en el proceso de lavado y no se puede prolongar el tiempo en que se realiza esta operación.

La granulometría del material filtrante desempeña un papel importante en la eficiencia del proceso, los resultados obtenidos indican que el material filtrante está compuesto solo por antracita, sin embargo se tienen dudas acerca de este resultado, ya que de ser así no se podría obtener un agua filtrada con las turbiedades medidas y registradas. Por esta razón, y a pesar de los intentos por captar correctamente las

muestras con el dispositivo utilizado, se deduce que no fue posible obtener la muestra de arena en estas unidades filtrantes.

A pesar de ello, se puede concluir que la antracita que contienen los filtros corresponden a granos finos, menor a lo recomendado en la literatura, con alto coeficiente de uniformidad.

A continuación la figura IV.38 representa la turbiedad del agua filtrada con respecto al tiempo de lavado para cada uno de los filtros. Se observa como varía la turbiedad desde el comienzo de la operación de lavado, donde se tienen los valores más altos de turbiedad y que va disminuyendo progresivamente hasta alcanzar valores de hasta 4 UNT, a excepción del filtro N°3 cuya mínima turbiedad es de 9 UNT aproximadamente. Como ya se mencionó no se puede prolongar el tiempo de lavado debido a que el tanque dispuesto para esto no tiene las dimensiones necesarias para alargar el tiempo de lavado, razón por la cual no sería posible obtener turbiedades menores a 4 UNT en el lavado de los filtros.



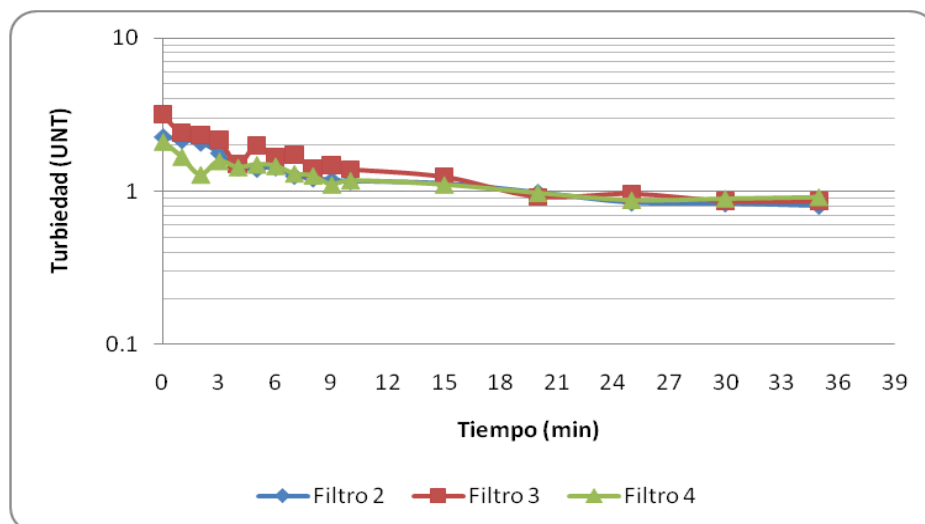
**Figura IV.38. Duración de la operación de lavado de los filtros de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.**

Es importante destacar, tal como se mencionó anteriormente, que durante la realización del trabajo se colocaron toma muestras de agua a la salida de cada uno de

los filtros, lo que permitió, entre otras cosas, evaluar su estabilización después del lavado.

La figura IV.39, contiene las curvas que indican el tiempo de estabilización de los filtros. Al analizar las turbiedades de cada uno de ellos luego del lavado se observa que el agua filtrada alcanza valores de hasta 3 UNT y va disminuyendo hasta estabilizarse luego de transcurridos 20 minutos, donde la turbiedad del efluente llega a valores menores de 1 UNT y se mantiene constante, lo que pareciera indicar que así con las limitaciones expuestas en el lavado de los filtros, estos producen un efluente adecuado al menos en los primeros 30 minutos de su carrera de filtración.

Por esta razón se insiste en supervisar la calidad del agua a lo largo de la carrera de filtración, para definir el lavado de los filtros, pues se demostró que los mismos producen turbiedades menores de 5 UNT, al menos en los primeros momentos de puesta en marcha de cada unidad de filtración.



**Figura IV.39** Tiempo de estabilización luego del lavado de los filtros de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO.

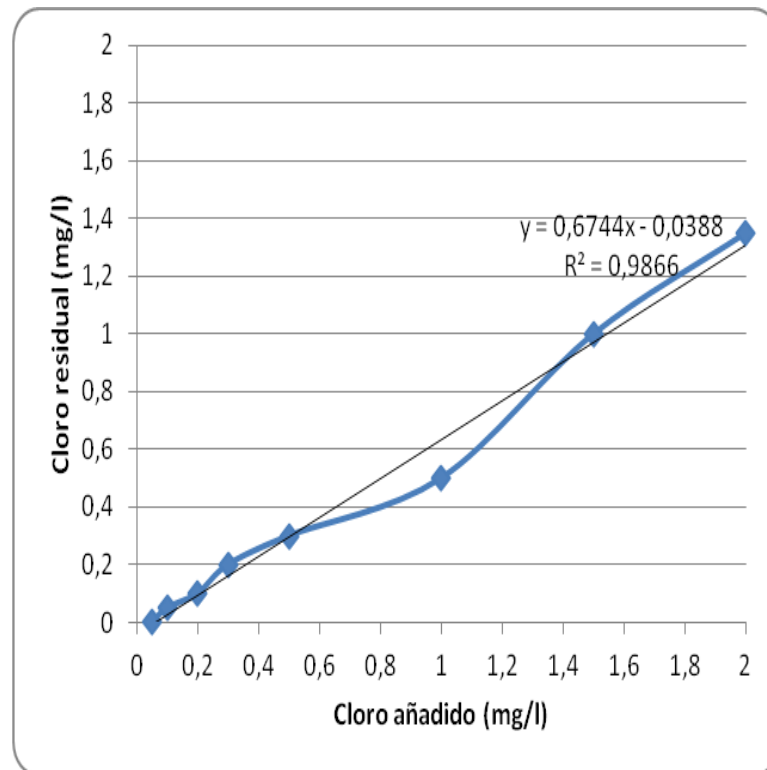
Las tasas de filtración relativamente bajas indican que esta batería de filtros pudiera tratar un mayor caudal o quizás operar solo dos (2) unidades alternadas para evaluar si mejora su funcionamiento. Por otra parte se puede decir que el lavado aunque pareciera ser efectivo podría mejorarse reparando las válvulas que regulan el

agua del retrolavado que están defectuosas, lo que impide un control preciso del caudal de lavado. Asimismo debe mejorarse la operación de esta unidad, para lo cual es necesario esperar unos minutos que se estabilice el lecho para abrir la entrada de agua y luego la válvula de filtración. Como parte de la operación es imprescindible captar agua filtrada a la salida de cada filtro y definir mejor su carrera de filtración.

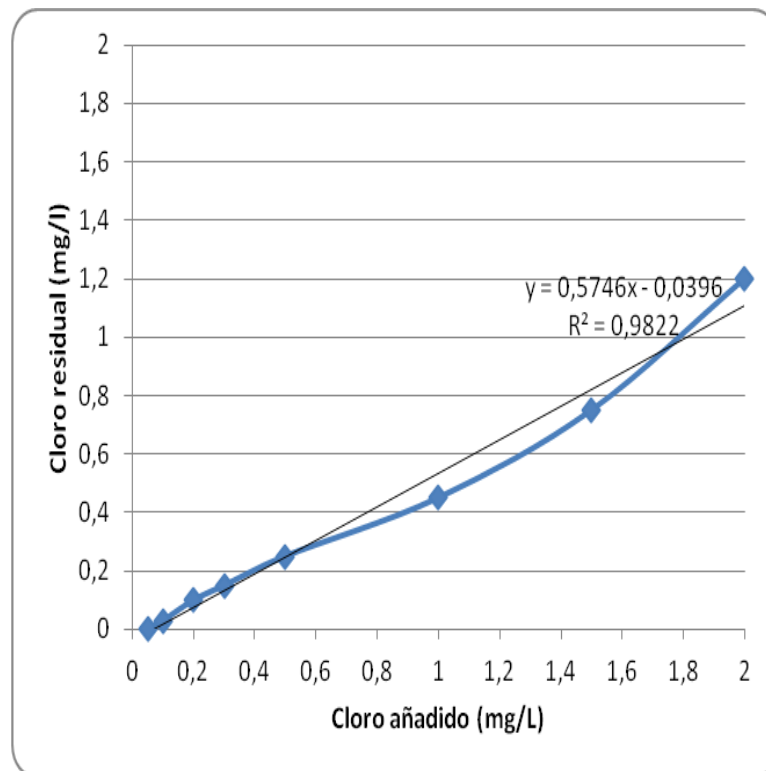
### **Demanda de cloro**

En el proceso de desinfección es importante considerar el punto de aplicación del cloro que en el caso de la planta de Pie de Cerro se ubica en la tubería de entrada a la planta donde ocurre la mayor turbulencia provocando una mejor dispersión y mayor eficiencia.

A continuación se presenta las curvas obtenidas para la demanda de cloro de la planta de tratamiento.(figuras IV.40 y IV.41).



**Figura IV.40. Curva de demanda de cloro de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO (alta turbiedad).**



**Figura IV.41** Curva de demanda de cloro de la P.T Pie de Cerro – HIDROCENTRO. (baja turbiedad)

Se observa que no presentan punto de quiebre debido a que el cloro residual aumenta con el cloro aplicado. Comparando este resultado con la curva reportada por la bibliografía (ver figura II.5), se puede notar que tanto la curva de la figura IV.40 como la de la figura IV.41, se ubican en el último tramo de la curva generalizada donde se tiene el cloro residual libre, ya que no existe la formación de cloraminas, debido a la ausencia de compuestos nitrogenados como el amoníaco, pues la curva no presenta la parte correspondiente a la formación y destrucción de las mismas.

Por otro lado, se puede resaltar que a pesar de que el ensayo de demanda de cloro se realizó para diferentes condiciones de turbiedad del agua (156 UNT y 18 UNT), la demanda propiamente dicha no presentó diferencias significativas para los distintos valores de turbiedad, manteniéndose entre 0,05 y 0,075 mg/l aproximadamente. Para alcanzar el residual de cloro establecido por la norma que es de 1 mg/l, la dosis de cloro a añadir para altas y bajas turbiedad está entre 1,5 y 1,8 mg/l respectivamente.

Al comparar los resultados obtenidos en el ensayo de la demanda, con los valores registrados por los operadores durante los días que se realizó la prueba, se pudo notar que en la planta de tratamiento no varían o varían muy poco la dosis de cloro añadida en la pre y post-cloración, manteniéndose entre 1,97 a 2,3 ppm y 0,23 a 0,28 ppm respectivamente. Las variaciones que se observan en la concentración de cloro se deben al aumento o disminución del caudal de entrada, este hecho se repite durante todo el mes (ver apéndice F).

Además se evidenció un gasto innecesario de cloro, ya que la cantidad suministrada en la pre-cloración es 97% mayor al necesario obtenido en la demanda, sin embargo en la post-cloración la dosis aplicada es menor a la derivada del ensayo para alcanzar el residual exigido por la norma de agua potable. Esta situación amerita una evaluación con la modificación de las cantidades de cloro dosificadas en la pre y post, con miras a minimizar el consumo de cloro, bajo el criterio de dosificar en la pre lo correspondiente a la demanda propiamente dicha (0,05 y 0,075 mg/l) mas una cantidad adicional que permita llegar a 0,5 mg/l de residual a la salida del sedimentador.

Aunque no se realizaron pruebas bacteriológicas, se conoce por los registros existentes en la planta, que el agua que se trata en esta planta no presenta coliformes totales ni fecales.

## **2.2 Medidas para la mejora con factibilidad de aplicación.**

A continuación se presenta una tabla (tabla IV.18) donde se detallan los problemas detectados, su clasificación, la propuesta para la mejora y el costo. Los costos están relacionados con la facilidad de adquisición de materiales y equipos que se necesitan en la planta no tanto por la disponibilidad de los recursos sino por los procedimientos administrativos que deberían hacer para la compra.

Los problemas se clasificaron en operativos y estructurales.

**Tabla IV.18. Medidas para la mejora de la calidad del agua producida en la planta de tratamiento Pie de Cerro  
y posibilidad de aplicación en el tiempo**

<b>Problema detectado</b>	<b>Clasificación del problema</b>	<b>Efectos</b>	<b>Propuesta de mejora</b>	<b>Costo estimado para la mejora*</b>	<b>Importancia **</b>
La dosificación de coagulante se realiza solo en base a los valores obtenidos en la turbiedad del agua cruda.	Operativo	Posible gasto excesivo de sulfato de aluminio	Realizar pruebas de jarros diariamente simulando la operación real de la planta, a fin añadir la dosis optima de coagulante que permita producir agua potable de mejor calidad, con el menor consumo de sustancias químicas	Bajo	Prioritaria
La dosificación de polímero se realiza de manera descuidada, no mantienen una inyección y concentración constante.	Operativo	Gasto innecesario de polímero y en ocasiones no se dosifica debido a que el tanque contenedor de la sustancia se vacía por descuido	Realizar pruebas de jarros ajustada a la operación real de la planta, a fin de detectar si es necesario la dosificación de polímero	Bajo	Prioritaria
La dosis de cloro aplicada en la pre-cloración en la planta no corresponde con la dosis requerida por la demanda de cloro.	Operativo	Mayor consumo de cloro	Realizar demanda de cloro, a fin de aplicar la dosis exacta en la pre y post cloración para lograr un menor consumo de esta sustancia	Bajo	Prioritaria
<p>*Los costos para la mejora están estimados de acuerdo a: bajo&lt;5.000, 00 Bs; medio=(5.000,00-15.000,00) Bs; alto&gt;15.000,00 Bs  **El carácter de importancia está estimado de acuerdo al orden: Prioritaria &gt; Deseable</p>					

**Tabla IV.18. Medidas para la mejora de la calidad del agua producida en la planta de tratamiento Pie de Cerro y posibilidad de aplicación en el tiempo (continuación)**

<b>Problema detectado</b>	<b>Clasificación del problema</b>	<b>Efectos</b>	<b>Propuesta de mejora</b>	<b>Costo estimado para la mejora*</b>	<b>Importancia **</b>
No se tiene un manual y registro del mantenimiento de cada unidad ni de los equipos existentes en la planta de tratamiento.	Operativo	El mantenimiento que se le da a la planta de tratamiento no es preventivo sino correctivo, además el mismo es realizado de acuerdo a la experiencia adquirida por el personal en dicha labor, de acuerdo al ensayo y error	Definir a través de un manual los pasos a seguir para el mantenimiento de cada una de las unidades y equipos de la planta y definir la periodicidad de las actividades limpieza y mantenimiento preventivo a fin de garantizar la operación eficiente. También es necesario diseñar una hoja de control de estas actividades	Bajo	Deseable
El caudal del agua de lavado de los filtros y la rutina de lavado no son adecuados	Operativo	Se pierde parte del material filtrante debido al caudal excesivo de lavado y además se logra una disminución de la eficiencia de estas unidades.	Colocar un controlador de flujo del agua de lavado, definir la periodicidad de las actividades limpieza y realizar un estudio más exhaustivo del material filtrante a fin de reponer el material granular en los filtros que se encuentren deficientes	Medio	Deseable
El desarenador del río Gabante no tiene una estructura firme y adecuada para soportar el caudal y la agresión de la naturaleza.	Estructural	Por lo general este desarenador se encuentra fuera de operación a causa de daños provocados por las crecidas del río	Rediseñar el desarenador, tomando en cuenta los cambios que ha sufrido el mismo por efecto de la naturaleza e intentar cambiar su ubicación	Alto	Deseable
*Los costos para la mejora están estimados de acuerdo a: bajo<5.000, 00 Bs; medio=(5.000,00-15.000,00) Bs; alto>15.000,00Bs **El carácter de importancia está estimado de acuerdo al orden: necesaria > Deseable > Ideal					

**Tabla IV.18. Medidas para la mejora de la calidad del agua producida en la planta de tratamiento Pie de Cerro  
y posibilidad de aplicación en el tiempo (continuación)**

<b>Problema detectado</b>	<b>Clasificación del problema</b>	<b>Efectos</b>	<b>Propuesta de mejora</b>	<b>Costo estimado para la mejora*</b>	<b>Importancia **</b>
No se cuenta con un medidor de caudal en la entrada de la planta de tratamiento.	Estructural	Inconvenientes al calcular la dosis óptima de sustancias químicas	Colocación del caudalímetro a la entrada de la planta	Medio	Prioritaria
Las compuertas de entrada de los filtros tienen pases de agua.	Estructural	Las válvulas que permiten el paso de agua a los filtros no cierran completamente al momento de realizar el lavado de las unidades	Reparar las compuertas que permiten el paso de agua a las unidades de filtración	Medio	Deseable
Inexistencia de tomas captadoras del agua de salida en cada uno de los filtros	Estructural	No se pueden evaluar por separado los filtros	Colocar una toma captadora de muestra en cada una de las salidas de los filtros	Bajo	Prioritaria
<p>*Los costos para la mejora están estimados de acuerdo a: bajo&lt;5.000, 00 Bs; medio=(5.000,00-15.000,00) Bs; alto&gt;15.000,00 Bs  **El carácter de importancia está estimado de acuerdo al orden: Necesaria &gt; Deseable &gt; Ideal</p>					

Para la clasificación de las medidas de acuerdo a su factibilidad técnica y económica, se realizó la tabla IV.19, la cual permite apreciar cuáles medidas fueron consideradas de corto, mediano y largo plazo. Resultando las de corto plazo aquellas cuya aplicación son de bajo o mediano costo y fueron sombreadas en color verde; las sombreadas en color amarillo se consideraron de aplicación a mediano plazo y por último la medida sombreada en color rojo clasificada como de largo plazo de aplicación. Es importante señalar que para garantizar que los cambios propuestos constituyan una mejora sustancial al proceso, es importante dar capacitación al personal operativo que les permita tener una mejor comprensión de lo que ocurre en la planta. El entrenamiento al personal debe incluir la práctica de cada una de las pruebas y comprensión de los parámetros a considerar en cada unidad.

**Tabla IV.19. Clasificación de las medidas para las mejoras en corto, mediano y largo plazo.**

<b>Costo</b> <b>Importancia</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>
<b>Prioritaria</b>	Prueba de jarros/ dosificación de sulfato	Colocación del caudalímetro	
	Prueba de jarros/ dosificación de polímero		
	Demanda de cloro		
	Toma captadora de muestra		
<b>Deseable</b>	Manual de operación y mantenimiento de cada una de las unidades y equipos	Controlador de flujo del agua de lavado	Rediseñar desarenador del río Gabante y cambiar su ubicación
		Reparar compuertas de paso de agua a unidades de filtración	
Las medidas están clasificadas por: verde=corto plazo; amarillo=mediano plazo y rojo= largo plazo			

### **3. Presentación de los cambios en la operación ejecutados que contribuyeron a una mejora en el proceso.**

Durante el tiempo que se realizó el presente trabajo de grado se generaron las siguientes mejoras en la planta, que contribuyeron indudablemente a mejorar el funcionamiento de la misma. Estas mejoras se mencionan a continuación:

- El cambio del dosificador de sulfato de aluminio con el consecuente cambio en el punto de aplicación (tubería de entrada a la unidad compacta) logró una reducción del 16% en el consumo aproximadamente (ver figura IV.22).
- La realización de la curva de calibración del equipo dosificador en seco volumétrico instalado en la planta, proporcionó una herramienta importante que le permite al operador dosificar la cantidad precisa de sulfato de aluminio para determinado caudal, así como conocer el rango de dosificación.
- Se realizó un instructivo (ver apéndice C) para realizar la prueba de jarros ajustada al proceso de mezcla rápida, mezcla lenta y sedimentación de la planta de tratamiento Pie de Cerro; una vez que se demostró que simuló la operación real de la planta, así como el ahorro de consumo de sulfato de aluminio, manteniendo la calidad del agua producida (ver tabla IV.16 y fig. IV.37).
- Se colocaron tomas de captación de muestras en cada uno de las salidas de los filtros 2, 3 y 4, lo cual permitió conocer el tiempo de estabilización de cada uno de ellos, a través de la determinación de la turbiedad del agua filtrada con respecto al tiempo, así como los valores de turbiedad producidos por cada unidad filtrante al inicio de su carrera de filtración (aproximadamente 1 UNT) (ver figura IV.39). Esto permite tener un registro y control temporal en cada uno de los filtros, con lo cual se puede establecer de manera más precisa la carrera de filtración.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES

A continuación se presentan las principales conclusiones:

- Las características del agua cruda presentan una variabilidad estacional que obedece a las condiciones climatológicas, incidiendo de manera significativa en el funcionamiento de la planta, mejorando en época de sequía y presentando mayores inconvenientes en época lluviosa.
- La instalación del equipo de dosificación gravimétrico con el consecuente cambio del punto de inyección en la tubería, produjo un ahorro aproximado del 16% en la cantidad de sulfato de aluminio empleado.
- Las principales relaciones dimensionales y parámetros de operación de los desarenadores se encuentran en el intervalo de valores recomendados, lo que aunado al comportamiento tendiente a flujo pistón y ausencia de espacios muertos, permite afirmar que ambos son capaces de remover las arenas transportadas por los ríos Gabante y Curtidor, especialmente éste último.
- Los gradientes y tiempos de retención que se producen tanto en la tubería como en el cilindro concéntrico de la unidad compacta, no se ajustan estrictamente a los valores de referencia, sin embargo la combinación de efecto tubería-cilindro, en especial para el caudal más frecuente (120 l/s), parece propiciar una mezcla rápida adecuada.
- Los gradientes y tiempos de retención que se producen en la unidad de mezcla lenta para el caudal más frecuente (120 l/s), garantiza una adecuada formación del flóculo, ya que se encuentran en los rangos recomendados en la literatura.
- Para el caudal más frecuente con el que opera la planta (120 l/s), la tasa de desbordamiento superficial, aunque puede producir una buena sedimentación, es relativamente alta, lo que condiciona una muy buena formación del flóculo, que implicaría el uso de ayudante de floculación.

- El comportamiento hidráulico de la unidad de sedimentación tiende a flujo mezclado, presenta cortocircuitos y zonas muertas, confirmando la inconveniencia del uso de unidades de sedimentación de sección cuadrada.
- La prueba de jarros modificada (para jarras de 2 l) que simula el proceso de coagulación, floculación y sedimentación para el caudal mas frecuente debe realizarse a 280 RPM durante 12 s, 96 RPM en 1 min, 15 s (mezcla rápida), 59 RPM durante 14 min (mezcla lenta). y finalmente captar la muestra a los 3 min. (sedimentación).
- Es indispensable conocer el caudal de entrada a la planta para calcular los parámetros RPM, tiempo de retención y tiempo de captación de la muestra, para simular el proceso de coagulación, floculación y sedimentación en la planta.
- Las tasas de filtración con el caudal más frecuente (120 l/s) y las tres unidades de filtración que se encuentran operativas, son apropiadas y están en el intervalo de valores establecidos; inclusive podría operarse la planta con 2 filtros para este caudal.
- A pesar de las limitaciones expuestas en el lavado de los filtros, en particular lo referente a las válvulas de lavado y al tamaño de grano de la antracita (inferior al recomendado), estos producen una turbiedad del efluente que llega a alcanzar valores de 1 UNT aproximadamente, en los primeros 20 minutos de la carrera de filtración.
- Los ensayos de demanda de cloro realizados evidenciaron, por una parte, la poca variación de la demanda con la calidad del agua y, por la otra, un excesivo consumo de cloro en la planta, específicamente en la etapa de pre-cloración, en el orden del 97%.
- Las medidas para la mejora de la planta que resultaron de aplicación en el corto plazo, por su carácter prioritario y de bajo costo fueron: realización de las pruebas de jarros ajustadas, realización de la demanda de cloro y colocación de tomas captación de muestras de agua a la salida en cada uno de los filtros.

- Las medidas de mejoras clasificadas como corto plazo, de costo medio e importancia deseable fueron la colocación del caudalímetro y realización de manuales de operación y mantenimiento de unidades y equipos.
- Las medidas de mediano plazo fueron la reparación de las compuertas de paso de agua a las unidades de filtración y la colocación del controlador de flujo de agua de lavado.
- La medida de largo plazo, fue el rediseño del desarenador del río Gabante con la posibilidad del cambio de su ubicación.

## CAPÍTULO VI

### RECOMENDACIONES

Las recomendaciones de este trabajo están orientadas fundamentalmente a presentar los ajustes y cambios necesarios para mejorar la operación y funcionamiento de la planta.

- Determinar la alcalinidad y el aluminio residual cada hora junto con los demás parámetros fisicoquímicos, ya que estos parámetros son importantes en la evaluación del tratamiento, así como los ensayos bacteriológicos.
- Colocar un caudalímetro a la entrada de la planta.
- Operar la planta con caudales de entrada menores a 120 l/s.
- Realizar pruebas de jarros diariamente según el instructivo realizado, a fin añadir la dosis óptima de coagulante que permita producir agua potable de mejor calidad, con el menor consumo de sustancias químicas.
- Repetir el ensayo de trazadores en la unidad de floculación utilizando una solución salina con una concentración apropiada para esta unidad.
- Instalar piezómetros que permitan determinar la pérdida de carga en cada filtro.
- Determinar las tasas de filtración y lavado, así como la expansión del lecho durante el lavado, al menos una vez al mes.
- Supervisar la calidad del agua a lo largo de la carrera de filtración, para definir el lavado de los filtros, utilizando los dispositivos toma muestras instalados durante la ejecución de este trabajo.
- Reparar las válvulas que regulan el agua del retrolavado para lograr un control preciso del caudal de lavado.
- Reparar las compuertas que permiten el paso de agua a las unidades de filtración.
- Colocar un controlador de flujo del agua de lavado.

- Realizar demanda de cloro y los ajustes requeridos en la distribución del cloro, a fin de aplicar la dosis adecuada en la pre y post cloración para lograr un menor consumo de esta sustancia.
- Rediseñar el desarenador del río Gabante, tomando en cuenta los cambios que ha sufrido el mismo por efecto de la naturaleza e intentar cambiar su ubicación.
- Incluir prácticas de mantenimiento preventivo y calibración de los equipos existentes en la planta de tratamiento como rutina de mantenimiento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acosta, I. (2008) *Uso de la Trazabilidad como Herramienta de Gestión de Calidad en una Planta de Tratamiento de Agua Potable*. Trabajo Especial de Grado. Ingeniería Química. Universidad de Central de Venezuela. Caracas.
2. American Water world Assosiation (AWWA). (2000) *Simulación del Funcionamiento de la Planta Mediante la Prueba de Jarro*. 2da ed.
3. Amore, G y Gómez, V. (1990) *Análisis Comparativo de Sistemas de Tratamiento de Potabilización de Aguas. IV. Diseño Teórico de Algunas Modalidades Existentes en el País*. Trabajo Especial de Grado. Ingeniería Civil. Universidad de Central de Venezuela. Caracas.
4. Amundaray, C., Ávila y Blanco, H. (1990) *Diagnóstico y Análisis de Costos de Sistemas de Tratamiento para Potabilización de Aguas Existente en Venezuela*. Trabajo Especial de Grado. Ingeniería Civil. Universidad de Central de Venezuela. Caracas.
5. Arboleda, J. (2000) *Teoría y Práctica de la Purificación del Agua*. 3era ed. Bogotá: Mc Graw Hill. Tomo I y II.
6. Arocha, S. (2011). *Acueductos: Fundamentos Teórico-Prácticos*. 1era ed. OIKOS Impresos, C.A, Venezuela.
7. Ayala, R. (2009) *Evaluación del Desempeño de la Planta de Potabilización de Agua Los Teranes, Estado Carabobo*. Trabajo Especial de Grado. Ingeniería Química. Universidad de Central de Venezuela. Caracas.
8. Cáceres O, (1990) *Desinfección del Agua*. Lima, Perú.
9. CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente) (1990) *Planta modulares de tratamiento de agua*. Documento técnico 8. 2da edición. Lima-Perú.

10. CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente) (2005) *Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación de Agua*. Lima-Perú.
11. Consonery, P.J., et al. (1996) *Evaluating and Optimizing Surface Water Treatment Plants: How Good is Good Enough?* Trabajo presentado en la conferencia de tecnología de calidad del Agua de AWWA, Boston, MA.
12. Fogler, S. (2001) *Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas*. 3era ed. México: Prentice Hall.
13. García, M. y Tortolano, S. (1991) *Planificación del Mantenimiento en Plantas de Potabilización de Agua*. Trabajo Especial de Grado. Ingeniería Civil. Universidad de Central de Venezuela. Caracas.
14. Masaaki, I. (1998) *Como Implementar El Kaizen en el Sitio de Trabajo*. McGrawHill.
15. Najul, M. y Blanco, H. (2003) *Material de Apoyo para el curso Manejo Eficiente de Plantas de Tratamiento de Potabilización de Aguas: Descripción de Sistemas Modulares y otras Modalidades para Potabilización*. Instituto Tecnológico, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Coro.
16. República de Venezuela. (1998) *Normas Sanitarias de la Calidad del Agua potable*. Gaceta Oficial N° 36.395. Caracas.
17. Romero, J. (1999) *Potabilización del Agua*. 3era. Ed. México D. F. Alfaomega.
18. Streeter, V, Wylie, B y Bedford, K. (2003) *Mecánica de fluidos*. 9na. Ed. Colombia: Mc Graw Hill.
19. WPCF, APHA y AWWA (1992) *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. 17ma. Ed. Madrid.

## APÉNDICES

### APÉNDICE A. Ficha técnica de la planta de tratamiento de Pie de Cerro. Septiembre 2011

#### Fuente de abastecimiento, captación, conducción y acondicionamiento previo

##### 1. Fuente de abastecimiento:

###### 1.1. Río: Gabante y Curtidor

###### 1.1.1. Tipo de Toma: Superficial, mediante dique toma captador en cada río.

El 95% del tiempo la planta recibe las aguas de ambos ríos mezcladas, aportando el Río Curtidor el 75% del caudal total y el resto aportado por Río Gabante.

###### 1.2. Conducción de agua cruda: Por gravedad

Río Gabante: A través de tubería de  $\phi = 8''$ , longitud 1.700 m aproximadamente.

Río Curtidor: A través de tubería de  $\phi = 10''$ , longitud 700 m aproximadamente.

###### 1.3. Desarenador:

Río	Gabante	Curtidor
Número de unidades:	01	02
Largo (m):	10,00	12,00
Ancho (m):	1,25	1,89
Profundidad útil (m):	2,00	0,94
Área superficial (m <sup>2</sup> ):	10,95	18,05

#### Características de la planta

##### 2. Caudal de la planta:

2.1. Caudal de proyecto: 150 l/s

2.2. Caudal de operación más frecuente: 120 l/s

2.3. Caudal máximo con el que opera la planta: 130 l/s. Ésta condición se presenta durante todo el año. Aunque no se tiene certeza del caudal real de operación ya que no se dispone de un medidor de caudal a la entrada.

2.4. Caudal mínimo con el que opera la planta: 50 l/s. Dicha condición ocurrió durante los meses de abril a julio de 2010, debido a las pocas precipitaciones ocurridas. Esta condición no es usual.

3. Tipo de planta:

3.1. Patente: Americana

3.2. Modalidad: Modular

3.3. Tipo CEIPS/OPS: No

3.4. Año de diseño: 1.989

3.5. Procesos: Pre y Post-Cloración, Coagulación, Floculación, Decantación y Filtración.

4. Descripción:

4.1. Mezcla Rápida:

	Cilindro	Tubería
Tipo:	Hidráulica	Hidráulica
Número de Unidades:	Uno (01)	Uno (01)
Alto (m):	5,10	-----
Diámetro (m):	1,50	0,30
Longitud (m):	-----	19,00
Tiempo de retención teórico de Diseño (min):	Desconocido	
Tiempo de retención teórico de Operación tubería (min):	0,19	
Tiempo de retención teórico de Operación cilindro (min):	1,25	

4.2. Mezcla Lenta:

Tipo: Flujo vertical descendente

Número de unidades: Uno (01)

Largo (m): 5,00

Ancho (m): 5,00  
Profundidad útil (m): 5,10  
Tiempo de retención teórico de Diseño (min): Desconocido  
Tiempo de retención teórico de Operación (min): 14,00

#### 4.3. Decantadores:

Tipo: Flujo vertical ascendente  
Número de unidades: Uno (01)  
Largo (m): 17,50  
Ancho (m): 17,50  
Profundidad útil (m): 5,10  
Área superficial (m<sup>2</sup>): 218,00  
Tiempo de retención teórico de diseño (min): Desconocido  
Tiempo de retención teórico de operación (min): 156,00  
Tasa desbordamiento superficial de diseño (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d): 43,06  
Tasa desbordamiento superficial de operación (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d): 48,00

#### 4.4. Filtros:

Tipo: Tasa constante  
Número de unidades: Cuatro (4)  
Largo (m): 3,75  
Ancho (m): 3,75  
Tipo de lecho filtrante: Mixto (arena y antracita)  
Tipo de fondo: Wheeler  
Area de filtración (m<sup>2</sup>): 14,06  
Tasa de filtración promedio de diseño (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d): Desconocido  
Tasa de filtración (limpio) promedio de operación (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d): 230,00

#### 4.5. Dosificación:

Desinfección:  
Sistema principal

Tipo de envases: Gas Cloro 2000 lb

Tipo: Inyección al vacío

Cantidad de equipos: Uno (1)

Evaporadores: No existe

Sistema Alterno

Tipo de envases: Gas Cloro 150 lb

Cantidad de equipos: Uno (1)

Tipo: Descarga libre

Coagulante: Sulfato de Aluminio Sólido

Tipo de dosificador: Modalidad 1: Dosificador en seco volumétrico  
 Modalidad 2: Descarga por gravedad.

Cantidad de equipos: Uno (1)

Punto de aplicación: Modalidad 1: Mezcla rápida.  
 Modalidad 2: Mezcla lenta.

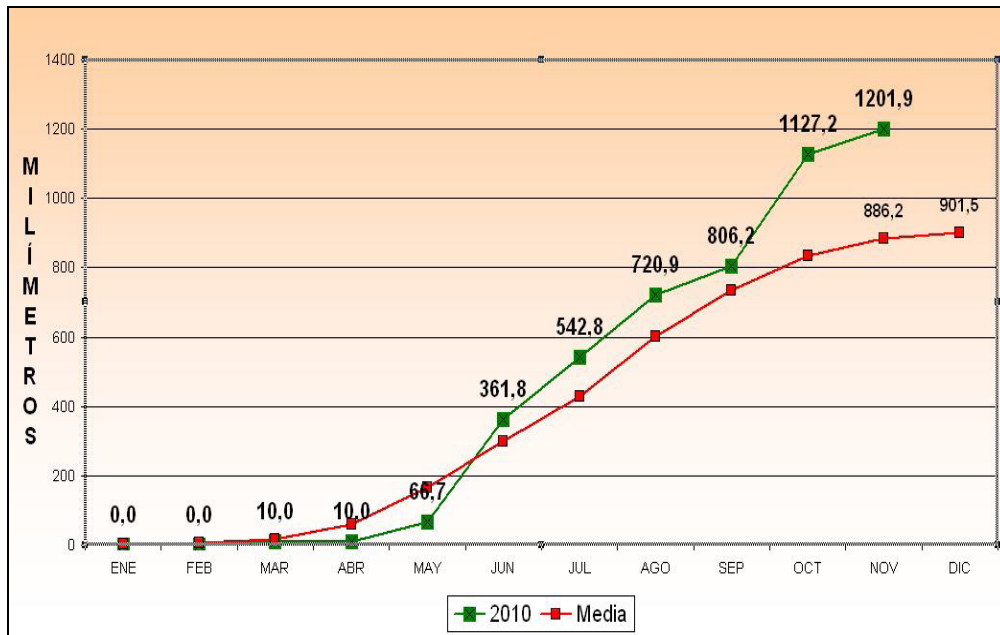
Coadyuvante de floculación: Polímero No Iónico (sólido)

Tipo de dosificador: Modalidad 1: Dosificación con bomba  
 de desplazamiento positivo.  
 Modalidad 2: Descarga por gravedad.

Cantidad de equipos: Uno (1)

Punto de aplicación: Modalidad 1: Mezcla lenta.  
 Modalidad 2: Mezcla lenta.

**APÉNDICE B. Precipitación acumulada en el año 2010 con respecto a la media acumulada en el estado Aragua.**



**Figura B.1 Precipitación acumulada en el año 2010 con respecto a la media acumulada en el estado Aragua. (INAMEH)**

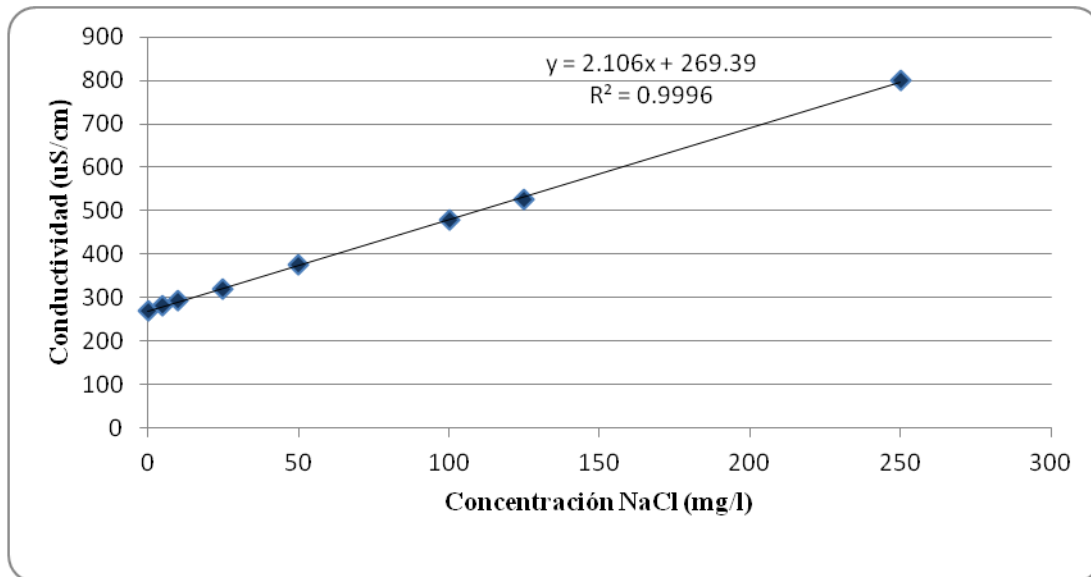
La figura anterior señala la precipitación acumulada para cada uno de los meses del año 2010, en comparación con la media acumulada desde el año 1970 hasta el 2009, este comportamiento coincide con el consumo de sulfato. En los primeros tres meses del año el consumo de sulfato fue aproximadamente cero, ya que por no haber lluvias los valores de turbiedad no son elevados y no se hace necesario usar coagulante.

## APÉNDICE C. Tablas y Curvas de calibración del ensayo de trazadores

**TABLA C.1. DATOS DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN**

(desarenador río Curtidor)

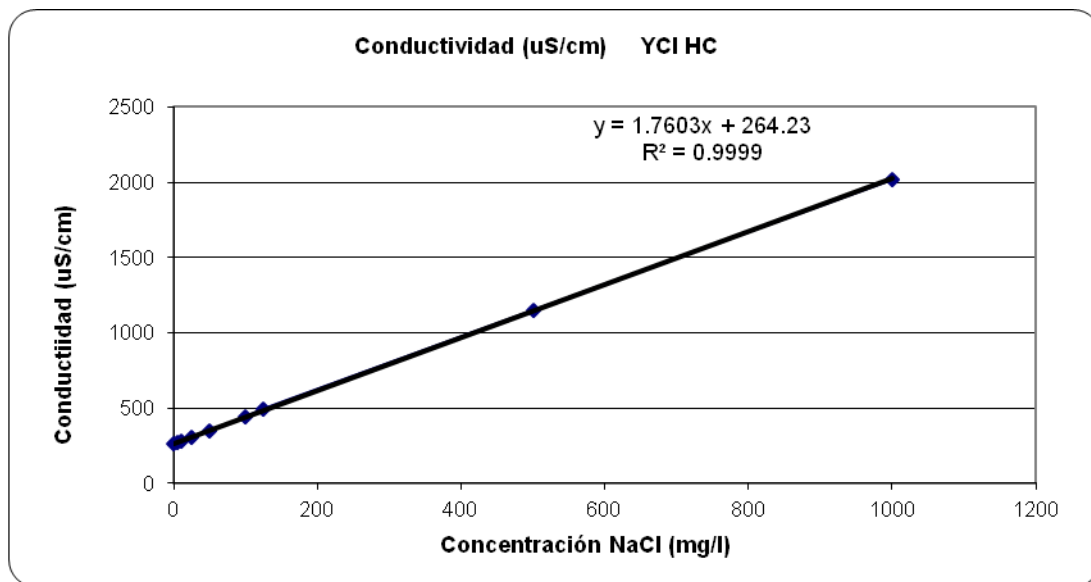
Concentración (mg/l)	Conductividad (μS/cm) WTW PETA
0	270
5	282
10	293
25	321
50	375
100	479
125	525
250	800



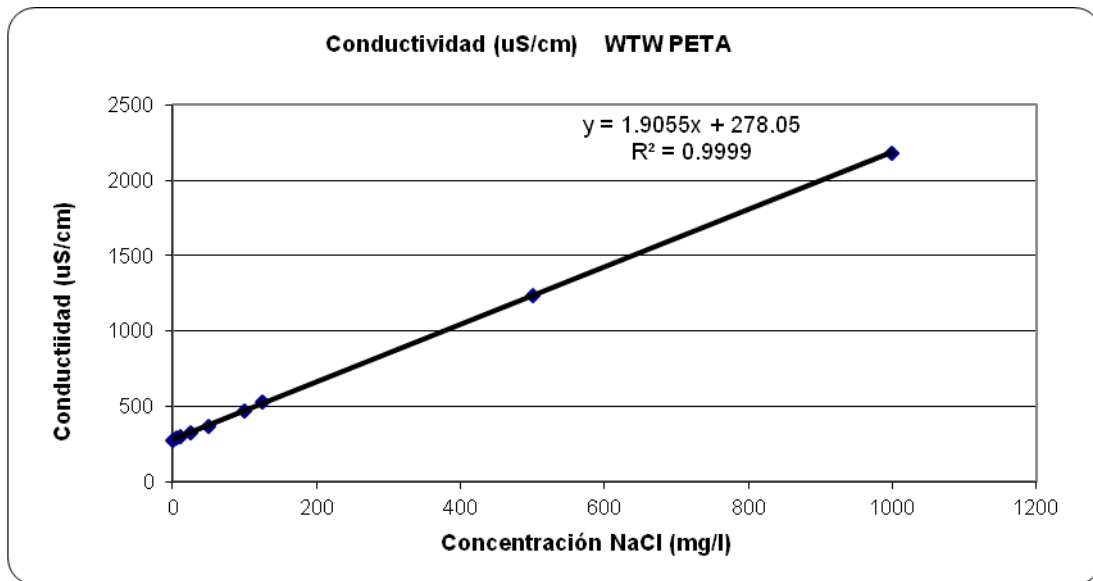
**Figura C.1. Curva de calibración conductímetro YCI PETA  
(Utilizado para el desarenador del río Curtidor)**

**TABLA C.2. Datos de las curvas de calibración (Sedimentador y floculador).**

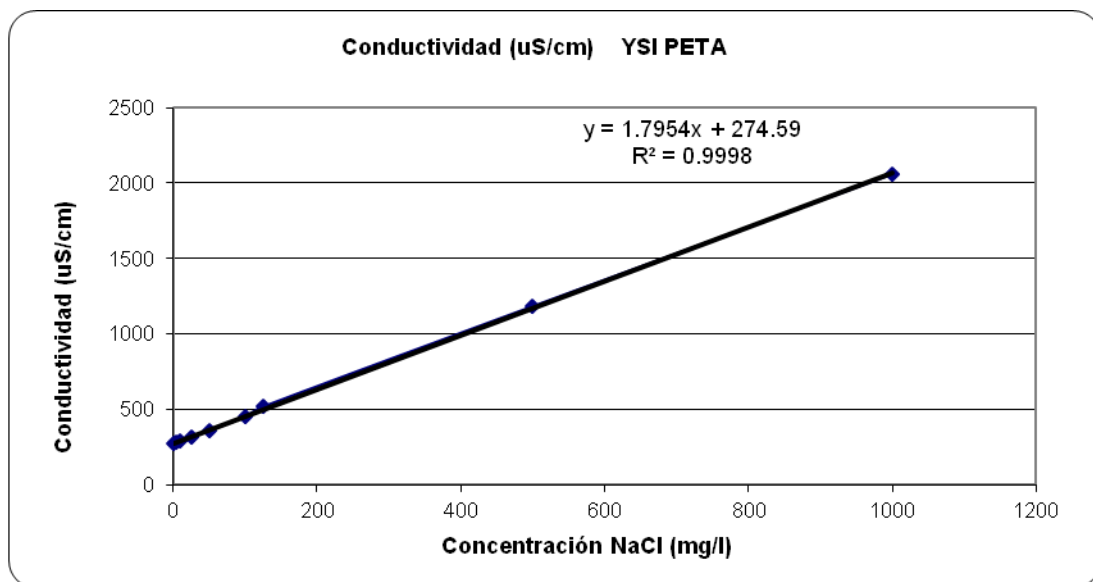
<b>Concentración (mg/l)</b>	<b>Conductividad (<math>\mu\text{S/cm}</math>) YSI HC</b>	<b>Conductividad (<math>\mu\text{S/cm}</math>) WTW PETA</b>	<b>Conductividad (<math>\mu\text{S/cm}</math>) YSI PETA</b>
0	261	274	271
5	271	287	281
10	280	297	290
25	304	322	313
50	349	370	358
100	442	469	452
125	495	526	518
500	1151	1236	1185
1000	2020	2180	2062



**Figura C.2. Curva de calibración conductímetro YCI HC (Sedimentador y floculador).**



**Figura C.3. Curva de calibración Conductímetro WTW PETA (Utilizado para el sedimentador)**



**Figura C.4. Curva de calibración Conductímetro YCI PETA (Utilizado para la unidad de mezcla lenta)**

**APÉNDICE D. Prueba de jarros ajustada para simular el proceso de mezcla rápida, mezcla lenta y sedimentación de la planta de tratamiento. *Planta Potabilizadora Pie de Cerro – HIDROCENTRO***

*Elaborado: Mariela Chourio – Tesista Ing. Química UCV*

*Revisado: Henry Blanco – Prof. Ingeniería Civil – UCV*

*Septiembre 2011*

Con la prueba de jarros ajustada se desea simular diferentes etapas del tratamiento en la planta potabilizadora de Pie de Cerro, tomando en cuenta los tiempos de retención, gradientes y tiempo de sedimentación en cada una de las etapas (AWWA, 2000).

A continuación se describe el procedimiento a seguir:

1. Determinar la temperatura, el color, la turbiedad y el pH del agua cruda que va a ser utilizada en la prueba de jarro. Esta muestra debe estar bien homogeneizada.
2. Considerando las condiciones del agua cruda, seleccionar la dosis que generalmente se aplica en esas condiciones para aplicarla en el jarro 4. Los jarros 1, 2 y 3 con dosis inferiores a la seleccionada y los jarros 5 y 6 con dosis mayores a la seleccionada.
3. Si la temperatura del agua es 5° mayor o menor a 23°C, recalcular los gradientes de velocidad y los rpm a utilizar en la agitación rápida y lenta de la prueba de jarro (No utilizar las tablas 1 y 2).
4. Si la temperatura se encuentra entre 19 y 27°C utilizar la tabla 1 o 2 para conocer las rpm y tiempos que se van a aplicar en la prueba de jarros. La tabla 1 corresponde a los jarros de 1 L y la tabla 2 a los jarros de 2 L.

5. Llenar los jarros con el agua cruda verificando que los parámetros de turbiedad, color, pH y temperatura son los mismos determinados al comienzo. Proceder a anotar estos valores en las planillas correspondientes; así como los rpm y tiempos a utilizar en la prueba de jarros.
6. Hacer girar las paletas a los rpm correspondientes a la mezcla rápida en la tubería (ver tabla 1 o 2) y con ayuda de una jeringa inyectar la dosis deseada de sulfato en cada uno de los jarros de manera simultánea, cuidando que la solución penetre profundamente para que la dispersión sea más rápida. Mantener esta velocidad por el tiempo de retención indicado en la mezcla rápida en la tubería (tabla 1 o 2).
7. Luego de transcurrido el tiempo de agitación que simula la mezcla rápida en la tubería, se disminuye la velocidad de rotación de las paletas a la requerida por la mezcla rápida en el cilindro durante el tiempo de retención correspondiente (previamente definido con el uso de la tabla 1 o 2). Seguidamente transcurrido ese tiempo se disminuyen los rpm al determinado para la mezcla lenta (tabla 1 o 2) y se deja flocular durante el tiempo de retención correspondiente, previamente definido por las tablas 1 o 2.
8. Transcurrido el tiempo de agitación en la mezcla lenta, se suspende la agitación, se extraen las paletas de los jarros y se dejan sedimentar los flóculos por el tiempo de sedimentación que correspondió según la tabla 1 o 2. Durante este tiempo se deberá observar la apariencia y consistencia del floc producido, así como su velocidad de decantación, utilizando las tablas de la WRI para definir el tamaño del floc.
9. Captar las muestras de cada jarro en el tiempo requerido (tablas 1 o 2) y proceder a determinar los parámetros de calidad; turbiedad, color, pH, y en la

medida de lo posible aluminio residual. La dosis óptima corresponderá a aquella donde los valores de color y turbiedad sean los más bajos y en donde la velocidad de decantación y consistencia del floc sean las mejores; así como el aluminio residual no sobrepase los valores permisibles de la norma.

10. Definida la dosis óptima en mg/l, proceder a colocar el dosificador volumétrico para que opere con la dosis seleccionada. Para ello utilizar el gráfico de la figura 1, colocando el valor de la dosis óptima seleccionada en ppm en el eje correspondiente y con una línea paralela al eje x “cortar” la curva correspondiente al caudal con el cual está trabajando la planta, para obtener la abertura a la cual se debe colocar el dosificador presentada en el eje x.
11. Una vez ajustado el dosificador a la abertura que corresponde utilizar la figura 2 para registrar los kg/h que corresponden a la abertura fijada en el dosificador. Este es la cantidad de sulfato que se está añadiendo por hora.
12. Una vez ajustado el dosificador en la abertura que corresponde a la dosis óptima seleccionada, verificar con las determinaciones de calidad del agua sedimentada que se realizan rutinariamente, que los valores de la turbiedad, color y pH en el agua sedimentada son muy similares a los que se obtuvieron en el jarro con la dosis óptima.
13. El dosificador debe ser aforado por lo menos cada hora para verificar los kg/h registrados en las planillas correspondientes, midiendo los gramos en un tiempo fijo y llevarlos a kg/h.

**NOTA IMPORTANTE:** Si varía el caudal que ingresa a la planta, así se mantenga la turbiedad, color y pH es necesario ajustar los valores, para lo cual se debe comenzar

con el paso 10. Si varía la calidad del agua, específicamente en lo que a turbiedad o color se refiere es necesario comenzar con el paso 1.

**TABLA D.1. TIEMPO DE RETENCIÓN Y RPM A DIFERENTES CAUDALES PARA JARRAS DE 1 LITRO DE SECCIÓN CIRCULAR SIN DEFLECTORES P.T. PIE DE CERRO – HIDROCENTRO**

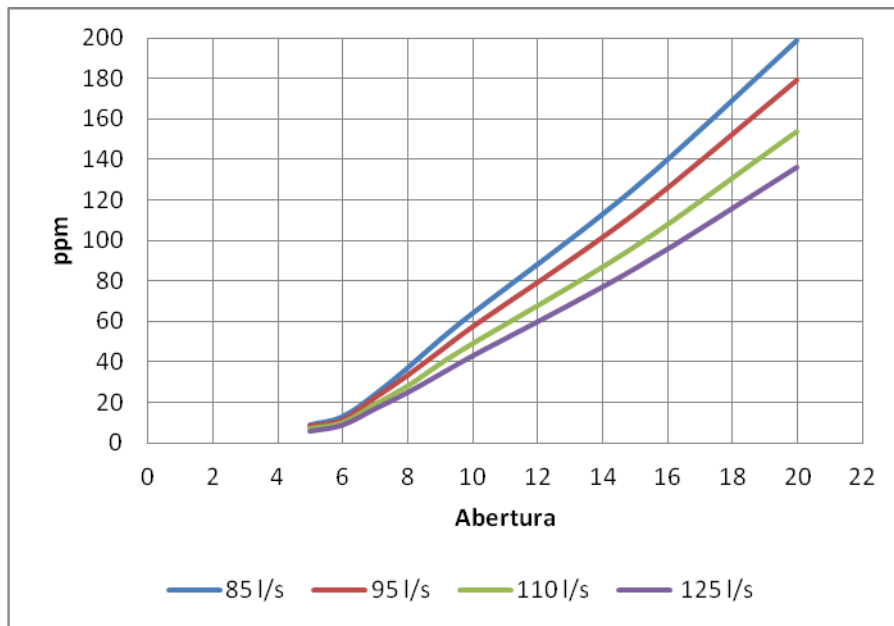
Caudal (l/s)	Mezcla rápida tubería		Mezcla rápida cilindro		Mezcla Lenta		Sedimentador
	Tiempo de agitación (s)	RPM	Tiempo de agitación (min y s)	RPM	Tiempo de agitación (min)	RPM	Tiempo para captar muestra (min)
85	16	310	1'46"	100	20	54	4
90	15	335	1'40"	107	19	57	4
95	15	357	1'35"	114	18	61	4
100	14	380	1'30"	121	17	65	4
105	13	399	1'26"	129	16	69	4
110	13	426	1'22"	136	16	73	3
115	12	449	1'19"	143	15	77	3
120	12	473	1'15"	151	14	81	3
125	11	492	1'12"	159	14	85	3
130	11	520	1'10"	166	13	89	3

*Nota: los rpm se calcularon utilizando la ecuación de Bhole para temperaturas entre 15 y 20 °C(1970)*

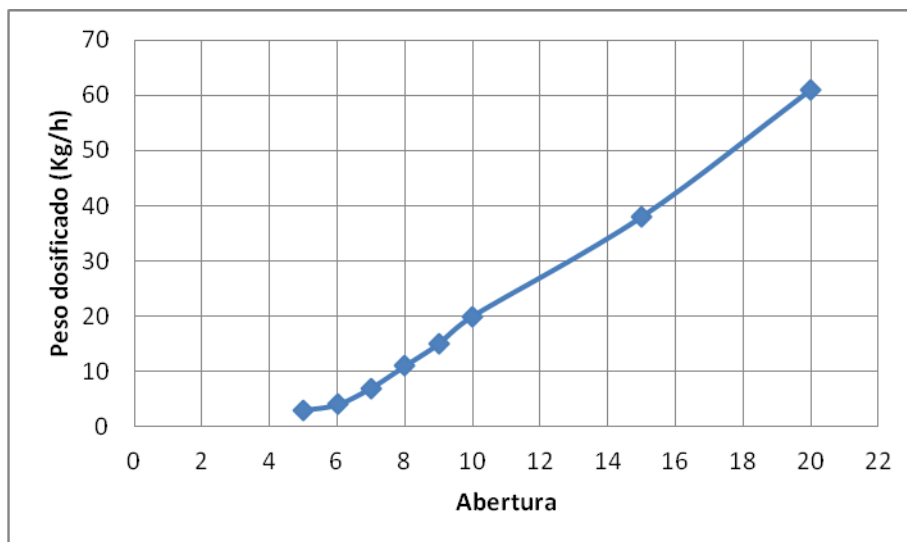
**TABLA D.2. TIEMPO DE RETENCIÓN Y RPM A DIFERENTES CAUDALES, PARA JARRAS DE 2 LITRO DE SECCIÓN CUADRADA P.T. PIE DE CERRO – HIDROCENTRO**

Caudal (l/s)	Mezcla rápida tubería		Mezcla rápida cilindro		Mezcla Lenta		Sedimentador
	Tiempo de agitación (s)	RPM	Tiempo de agitación (min y s)	RPM	Tiempo de agitación (min)	RPM	Tiempo para captar muestra (min)
85	16	190	1'46"	70	20	42	4
90	15	210	1'40"	79	19	44	4
95	15	220	1'35"	80	18	47	4
100	14	235	1'30"	85	17	50	4
105	13	250	1'26"	86	16	52	4
110	13	260	1'22"	90	16	53	3
115	12	270	1'19"	94	15	57	3
120	12	280	1'15"	96	14	59	3
125	11	290	1'12"	100	14	62	3
130	11	310	1'10"	110	13	65	3

*Nota: los rpm se obtuvieron del Ábaco que relaciona el gradiente de velocidad con las revoluciones por minuto a 23 °C desarrollado por la Universidad de Michigan.*



**Figura D.1. Concentración de sulfato en ppm vs abertura del aparato dosificador volumétrico a diferentes caudales. P.T. Pie de Cerro – HIDROCENTRO**



**Figura D.2. Curva de calibración del dosificador volumétrico P.T. Pie de Cerro – HIDROCENTRO**

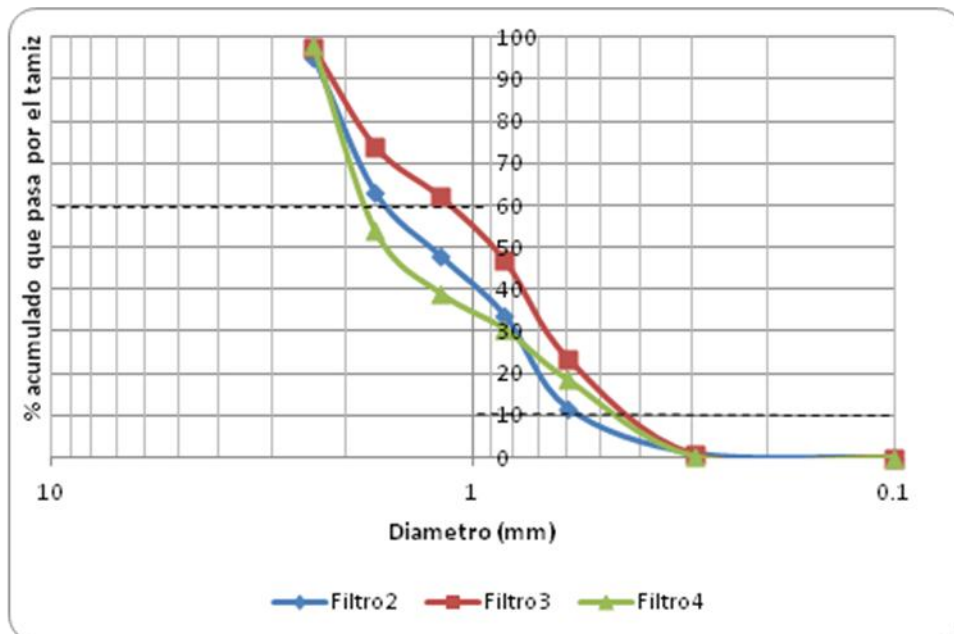
**TABLA D.3. Dosis de sulfato de aluminio aplicada a los jarros durante la realización de la prueba.**

<b>Jarro</b>	<b>Dosis de coagulante (mg/l)</b>			
	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Prueba 4</b>
<b>1</b>	9	9	9	2
<b>2</b>	12	13	11	3
<b>3</b>	22	17	14	4
<b>4</b>	34	21	17	5
<b>5</b>	46	25	23	6
<b>6</b>	62	30	28	7

**APÉNDICE E. Resultados de la granulometría del material filtrante proveniente de la planta de tratamiento de Pie de Cerro**

**Tabla E.1. Resultados de la granulometría del material filtrantes proveniente de la planta de tratamiento de Pie de Cerro.**

N° de tamiz	Equivalente Tyler	Diámetro (mm)	Filtro 2		Filtro 3		Filtro 4	
			% $X_i$	$\sum X_i$	% $X_i$	$\sum X_i$	% $X_i$	$\sum X_i$
8	8	2,38	4,7	0,047	2,5	0,025	2,0	0,02
12	10	1,70	33,0	0,377	23,5	0,26	44,0	0,46
16	14	1,19	14,5	0,522	12,0	0,38	14,9	0,609
20	20	0,841	14,0	0,662	15,0	0,53	8,5	0,694
30	28	0,595	22,1	0,883	23,5	0,765	12,1	0,815
50	48	0,297	10,8	0,991	23	0,995	18,3	0,998
---	---	< 0,297	0,9	1	0,5	1	0,2	1
$\Sigma$			100,0		100,0		100,0	



**Figura E.1. Curvas granulométricas del medio filtrante. PT- Pie de Cerro.**

**APÉNDICE F. Tablas de dosificación de cloro en la pre y pos cloración durante el mes de agosto de 2011.**

**TABLA F.1. Datos de dosificación de cloro en un día con alta turbiedad y otro con baja turbiedad.**

Hora	Alta turbiedad			Baja turbiedad		
	Cloro-pre (ppm)	Cloro-post (ppm)	Caudal entrada (L/s)	Cloro-pre (ppm)	Cloro-post (ppm)	Caudal entrada (L/s)
01:00	1.97	0.23	120	2.36	0.28	100
02:00	1.97	0.23	120	2.36	0.28	100
03:00	1.97	0.23	120	2.36	0.28	100
04:00	1.97	0.23	120	2.36	0.28	100
05:00	1.97	0.23	120	2.36	0.28	100
06:00	1.97	0.23	120	2.36	0.28	100
07:00	1.97	0.23	120	2.36	0.28	100
08:00	1.97	0.23	120	2.36	0.28	100
09:00	1.97	0.23	120	2.36	0.28	100
10:00	1.97	0.23	120	2.36	0.28	100
11:00	1.97	0.23	120	1.97	0.23	120
12:00	1.97	0.23	120	1.97	0.23	120
13:00	1.97	0.23	120	1.97	0.23	120
14:00	2.36	0.28	100	1.97	0.23	120
15:00	2.36	0.28	100	1.97	0.23	120
16:00	2.36	0.28	100	1.97	0.23	120
17:00	2.36	0.28	100	2.36	0.28	100
18:00	2.36	0.28	100	2.36	0.28	100
19:00	2.36	0.28	100	2.36	0.28	100
20:00	2.36	0.28	100	2.36	0.28	100
21:00	2.36	0.28	100	2.36	0.28	100
22:00	2.36	0.28	100	2.36	0.28	100
23:00	2.36	0.28	100	2.36	0.28	100
24:00	2.36	0.28	100	2.36	0.28	100
<b>Promedio</b>	2.15	0.25		2.26	0.27	

**TABLA F.2. Datos promedios de dosis de cloro en la pre y post-cloración durante el mes de agosto y su respectivo valor de turbiedad.**

<b>Fecha</b>	<b>Cloro-pre (ppm)</b>	<b>Cloro-post (ppm)</b>	<b>Turbiedad (UNT)</b>
8/1/2011	2.36	0.28	24
8/2/2011	2.36	0.28	21
8/3/2011	2.36	0.28	118
8/4/2011	2.36	0.28	80
8/5/2011	2.13	0.25	75
8/6/2011	2.36	0.28	53
8/7/2011	2.36	0.28	30
8/8/2011	2.52	0.28	20
8/9/2011	2.26	0.27	23
8/10/2011	2.36	0.28	230
8/11/2011	2.36	0.28	61
8/12/2011	2.12	0.25	66
8/13/2011	1.97	0.23	78
8/14/2011	1.97	0.23	76
8/15/2011	2.13	0.25	95
8/16/2011	2.13	0.25	71
8/17/2011	1.9	0.23	93
8/18/2011	2.16	0.25	118
8/19/2011	2.36	0.28	73
8/20/2011	2.22	0.26	85
8/21/2011	2.16	0.25	100
8/22/2011	2.36	0.28	57
8/23/2011	2.36	0.28	79
8/24/2011	2.36	0.28	85
8/25/2011	2.34	0.28	69
8/26/2011	2.2	0.26	46
8/27/2011	1.97	0.23	60
8/28/2011	2.25	0.26	86
8/29/2011	2.13	0.25	86
8/30/2011	2.18	0.26	90
8/31/2011	2.47	0.29	23

## APÉNDICE G. Cálculos tipo

Los datos suministrados a continuación fueron utilizados para realizar los cálculos de los parámetros en cada una de las unidades que conforman la planta de tratamiento de Pie de Cerro utilizando las fórmulas presentadas en el capítulo II. Los resultados obtenidos en esta sección fueron calculados utilizando el caudal más frecuente (120 l/s).

A) Datos de los desarenadores.

<b>Dimensiones</b>	<b>Curtidor</b>	<b>Gabante</b>
Número de unidades	2	1
Largo total (m)	12	10
Largo zona de sedimentación (m)	9.55	8.76
Ancho (m)	1.89	1.25
Profundidad (m)	0.94	2
Área superficial (m <sup>2</sup> )	18.05	10.95
Área transversal (m <sup>2</sup> )	1.78	2.50
Área transversal ent.(m <sup>2</sup> )	0.28	
Viscosidad absoluta del agua 21°C (μ) [cm <sup>2</sup> *s]	0.00984	
Aceleración de gravedad (cm/ s <sup>2</sup> )	980	

Río Curtidor

Tiempo de retención teórico ( $\theta_t$ )

$$\theta_t = V/Q$$

$$V = L * A * P$$

$$V = (9,55 * 1,89 * 0,94) \text{ m}^3 = 17 \text{ m}^3$$

$$\theta_t = 17 \text{ m}^3 * \text{min} / 2,7 \text{ m}^3 = 6 \text{ min}$$

Tasa de Desbordamiento Superficial (TDS)

$$TDS = Q / A_s$$

$$TDS = ((2,7 \text{ m}^3/\text{min}) / 18,05 \text{ m}^2) * 1440 = 215 \text{ m}^3 / \text{m}^2/\text{día}$$

Velocidad horizontal ( $v_h$ )

$$v_h = Q / A_t$$

$$v_h = ((2,7 \text{ m}^3 / \text{min}) / 1,78 \text{ m}^2) / 60 = 0,03 \text{ m/s}$$

Velocidad de resuspensión ( $V_{res}$ )

$$V_{res} = 125 \cdot ((S - 1) \cdot d)^{1/2}$$

$$V_{res} = (125 \cdot ((2,65-1) \cdot 0,0052 \text{ cm})^{1/2}) / 100 = 0,12 \text{ m/s}$$

Cálculo del diámetro ( $d$ ) de la partícula:

$$Vs = \frac{(S-1) \cdot g \cdot d^2}{18 \cdot \nu}$$

Donde:

$V_s$  = velocidad de sedimentación ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ )

$g$  = aceleración de gravedad ( $\text{cm}/\text{s}^2$ )

$\nu$  = viscosidad cinemática ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

Como TDS es un valor conocido y  $TDS = V_s$ , la incógnita será el diámetro de la partícula, entonces:

$$d = \left( \frac{V_s \cdot 18 \cdot \nu}{(S-1) \cdot g} \right)^{1/2}$$

$$d = \left( \frac{0,25 \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot 18 \cdot 0,00984 \text{ cm}^2/\text{s}}{(2,65-1) \cdot 980 \text{ cm}/\text{s}^2} \right)^{1/2} = 0,0052 \text{ cm}$$

B) Datos de la unidad de mezcla rápida.

Número de unidades

1

Profundidad de la unidad[m]	5.1
Diámetro de la unidad [m]	1.5
Diámetro de la tubería que alimenta la unidad [m]	0.30
Longitud de la tubería [m]	19
Viscosidad absoluta del agua 23 °C ( $\mu$ ) [kg/m*s]	0.000938
Densidad del agua a 23°C ( $\rho$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	997.57
Rugosidad absoluta del acero galvanizado ( $\epsilon$ ) [mm]	0.15
Peso específico del agua ( $\gamma$ ) [kg/(m <sup>2</sup> *s <sup>2</sup> )]	9800
$K_{\text{codo de 45°}}$	0.4
$K_{\text{codo de 90°}}$	0.75
$K_{\text{sal. tub. matriz}}$	1

Tiempo de retención teórico ( $\theta_t$ )

Mezcla rápida (tubería)

$$\theta_t = V/Q$$

El volumen utilizado en esta ecuación es el volumen de la tubería, como la tubería es cilíndrica el volumen se calcula de la siguiente manera:

$$V_{\text{tubería}} = \pi * (D_t / 2)^2 * L_t = V$$

$$V = \pi * (0,3 \text{ m} / 2)^2 * 19 \text{ m} = 1,34 \text{ m}^3$$

Entonces,

$$\theta_t = 1,34 \text{ m}^3 / (120 \text{ l/s} * (60/1000)) = 0,19 \text{ min}$$

Gradiente de velocidad (G)

$$G = \left( \gamma \frac{h}{\mu \cdot \theta} \right)^{1/2}$$

Pérdida de carga

Para el cálculo de la pérdida de carga se utilizó una de las fórmulas más exactas para cálculos hidráulicos como lo es la de Darcy-Weisbach.

$$h_T = h_L + h_m$$

$$h_T = f \cdot \left(\frac{L}{D}\right) \cdot \left(\frac{V^2}{2 \cdot g}\right) + \sum K_i \cdot \left(\frac{V^2}{2 \cdot g}\right)$$

Cálculo de la velocidad media ( $v_m$ )

$$v_m = Q/A$$

$$v_m = (120 \text{ l/s} \cdot 1000) / \pi \cdot (0,3 \text{ m} / 2)^2 = 1,64 \text{ m/s}$$

El coeficiente de fricción  $f$  es función del número de Reynolds ( $Re$ ) y del coeficiente de rugosidad o rugosidad relativa de las paredes de la tubería ( $\epsilon$ ):

$$Re = (\rho \cdot Q \cdot D_i) / \mu$$

$$Re = (997,57 \text{ kg/m}^3 \cdot (0,120 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 0,3 \text{ m}) / 0,000938 \text{ kg/m} \cdot \text{s} = 533110$$

$$\epsilon / D = 0,15 \text{ mm} / 300 \text{ mm} = 0,0005$$

Para el cálculo de " $f$ " existen múltiples ecuaciones, en el cálculo de este factor se consideró la ecuación de Colebrook-White (1939) que es válida para todo tipo de flujos y rugosidades. Es la más exacta y universal, pero el problema radica en su complejidad y en que requiere de iteraciones:

$$1 / \sqrt{f} = -2 \log [(\epsilon / 3,71 D) + (2,51 / Re \sqrt{f})]$$

Sin embargo Moody (1944) consiguió representar la expresión de Colebrook-White en un ábaco de fácil manejo para calcular " $f$ " en función del número de Reynolds ( $Re$ ) y actuando la rugosidad relativa ( $\epsilon$ ) como parámetro diferenciador de las curvas, con lo cual se pudo hallar de manera satisfactoria el valor de  $f$ .

$$\text{Donde } f = 0,018$$

$$h_T = 0,018 \cdot ((19 \text{ m} / 0,3 \text{ m}) \cdot ((1,64 \text{ m/s})^2 / 2 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2)) + ((2 \cdot 0,45) + 0,75) \cdot ((1,64 \text{ m/s})^2 / 2 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2)$$

$$h_T = 0,369 \text{ m}$$

Finalmente se halló el gradiente de velocidad:

$$G = (9800 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^2 \cdot 0,369 \text{ m} / 0.000938 \text{ kg/m} \cdot \text{s} \cdot 11,4\text{s})^{1/2} = 577 \text{ s}^{-1}$$

De manera similar se calcularon los distintos parámetros en el cilindro concéntrico.

C) Datos de la unidad de mezcla lenta.

Número de unidades	1
Largo [m]	4.7
Ancho [m]	4.7
Profundidad [m]	5.1
Largo de los codos (m)	0,14
Ancho de los codos (m)	0,14
Área de los codos (m <sup>2</sup> )	0.0196
Área superficial (m <sup>2</sup> )	23.2
Peso específico del agua ( $\gamma$ ) [kg/(m <sup>2</sup> *s <sup>2</sup> )]	9800
Viscosidad absoluta del agua 23 °C ( $\mu$ ) [kg/m*s]	0.000938
K <sub>codo 90°</sub>	1
K <sub>expansión brusca</sub>	1
K <sub>entrada brusca</sub>	0,6

Tiempo de retención teórico ( $\theta_t$ )

$$\theta_t = V/Q$$

$$V = V_{\text{Floculador}} - V_{\text{cilindro concéntrico}}$$

$$V_{\text{Floculador}} = L \cdot A \cdot P = (4,7 \cdot 4,7 \cdot 5,1) \text{ m}^3 = 112,70 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{cilindro concéntrico}} = \pi \cdot (D_{\text{cc}} / 2)^2 \cdot L_{\text{cc}} = \pi \cdot (1,5 / 2)^2 \cdot 5,1 = 9,012 \text{ m}^3$$

$$V = (112,7 - 9,012) \text{ m}^3 = 104 \text{ m}^3$$

$$\theta_t = 104 \text{ m}^3 / (120 \text{ l/s} \cdot (60/1000)) = 14 \text{ min}$$

Velocidad media en los codos ( $v_c$ )

$$v_c = Q/A_{\text{codos}}$$

Como esta unidad contiene cuatro codos el caudal es dividido entre la cantidad de codos.

$$v_c = 120 \text{ l/s} / (1000 \cdot 4) / 0,0196 \text{ m}^2 = 1,53 \text{ m/s}$$

Pérdida de carga ( $h_f$ )

$$h_f = \sum K * v_c^2 / 2 * g$$

$$h_f = (1+1+0,6) * (1,53 \text{ m/s})^2 / 2 * 9,8 \text{ m/s}^2 = 0,311 \text{ m}$$

Gradiente de velocidad (G)

$$G = \left( \gamma \frac{h}{\mu \cdot \theta} \right)^{1/2}$$

$$G = (9800 \text{ kg/m}^2 * \text{s}^2 * 0,311 \text{ m} / 0.000938 \text{ kg/m*s} * 840 \text{ s})^{1/2} = 61 \text{ s}^{-1}$$

D) Datos Dosificador de sulfato de aluminio

Tiempo de llenado (s)	576
Dimensiones del tanque de mezcla	
Diámetro (m)	0,6
Profundidad (m)	0,72

Caudal del dosificador ( $Q_d$ )

$$Q_d = v_d * A_d$$

$$v_d = h(\text{m}) / t(\text{s}) = 0,72 \text{ m} / 576 \text{ s} = 0,00125 \text{ m/s}$$

$$A_d = 2 * \pi * r * h = 2 * \pi * 0,3 \text{ m} * 0,72 \text{ m} = 1,36 \text{ m}^2$$

$$Q_d = 0,00125 \text{ m/s} * 1,36 \text{ m}^2 = 1,7 \text{ l/s}$$

Tiempo de retención del tanque de disolución ( $\theta_t$ )

$$\theta_t = V / Q$$

$$V = \pi * r^2 * h = \pi * (0,3 \text{ m})^2 * 0,72 \text{ m} = 0,204 \text{ m}^3$$

$$\theta_t = 204 \text{ l} / (1,7 \text{ l/s} * 60) = 2,00 \text{ min}$$

E) Datos de la unidad de sedimentación.

Número de unidades	1
Largo [m]	15,5
Ancho [m]	15,5
Profundidad [m]	5,1
Longitud de vertedero [m]	68,0
Alto ventana entrada al sedimentador [m]	0,33
Largo ventana entrada al sedimentador [m]	0,70
Número de ventanas de entrada	16

Tiempo de retención teórico ( $\theta_t$ )

$$\theta_t = V/Q$$

Como la unidad de sedimentación es cuadrada el volumen se calcula de la siguiente manera:

$$V = L * A * P = (15,5 * 15,5 * 5,1) \text{ m}^3 = 1225,275 \text{ m}^3$$

A esto le quitamos el área que ocupa la unidad de mezcla lenta, por lo tanto el volumen del sedimentador será:

$$V = (1225,275 - 103,65) \text{ m}^3 = 1121,63 \text{ m}^3$$

$$\theta_t = 1121,63 \text{ m}^3 / (0,12 \text{ m}^3/\text{s} / 60) = 156 \text{ min}$$

Tasa de Desbordamiento Superficial (TDS)

$$TDS = Q/A_s$$

$$TDS = (0,12 \text{ m}^3/\text{s} * 86400) / ((15,5 * 15,5) - 25) \text{ m}^2 = 48 \text{ m}^3/\text{m}^2 * \text{día}$$

Velocidad promedio de entrada a la unidad ( $v_{ent}$ )

$$v_{ent} = \frac{Q}{A_t \text{ paso}} * N^\circ \text{ de ventanas}$$

$$v_{ent} = 0,12 \text{ m}^3/\text{s} / (0,33 \text{ m} * 0,7 \text{ m} * 16) = 0,032 \text{ m/s}$$

Carga unitaria de vertederos (CUV)

$$CUV = \frac{Q}{L_{vert}}$$

$$CUV = (0,12 \text{ m}^3/\text{s} * 3600) / 68 \text{ m} = 6 \text{ m}^3/(\text{m}_{vert} * \text{h})$$

F) Datos de la unidad de filtración.

Número de unidades	4
Largo [m]	3.75
Ancho[m]	3.75
Área de Filtración [m <sup>2</sup> ]	14.06

Velocidad de filtración ( $v_f$ )

$$v_f = Q / N^o * A_f$$

$$v_f = (0,12 \text{ m}^3/\text{s} * 86400) / 3 * 14,06 \text{ m}^2 = 246 \text{ m}^3 / \text{m}^2 / \text{día}$$

Diámetro efectivo ( $d_e$ )

Los valores de  $P_{60}$  y  $P_{10}$  se obtienen de la curva granulométrica representada en la figura D.3 del apéndice D.

$$d_e = P_{10} = 0,6 \text{ mm}$$

Coefficiente de uniformidad (CU)

$$CU = P_{60} / P_{10} = 1,74 \text{ mm} / 0,6 \text{ mm} = 2,9$$

## APÉNDICE H. Tablas y figuras utilizadas para el cálculo de parámetros

En la siguiente tabla se muestran algunos valores de rugosidad absoluta para distintos materiales:

**Tabla H.1. Rugosidad absoluta para distintos materiales (Streeter y Bedford, 2003).**

Material	$\epsilon$ (mm)	Material	$\epsilon$ (mm)
Plástico (PE, PVC)	0,0015	Fundición asfaltada	0,06-0,18
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,01	Fundición	0,12-0,60
Tubos estirados de acero	0,0024	Acero comercial y soldado	0,03-0,09
Tubos de latón o cobre	0,0015	Hierro forjado	0,03-0,09
Fundición revestida de cemento	0,0024	Hierro galvanizado	0,06-0,24
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024	Madera	0,18-0,90
Fundición centrifugada	0,003	Hormigón	0,3-3,0

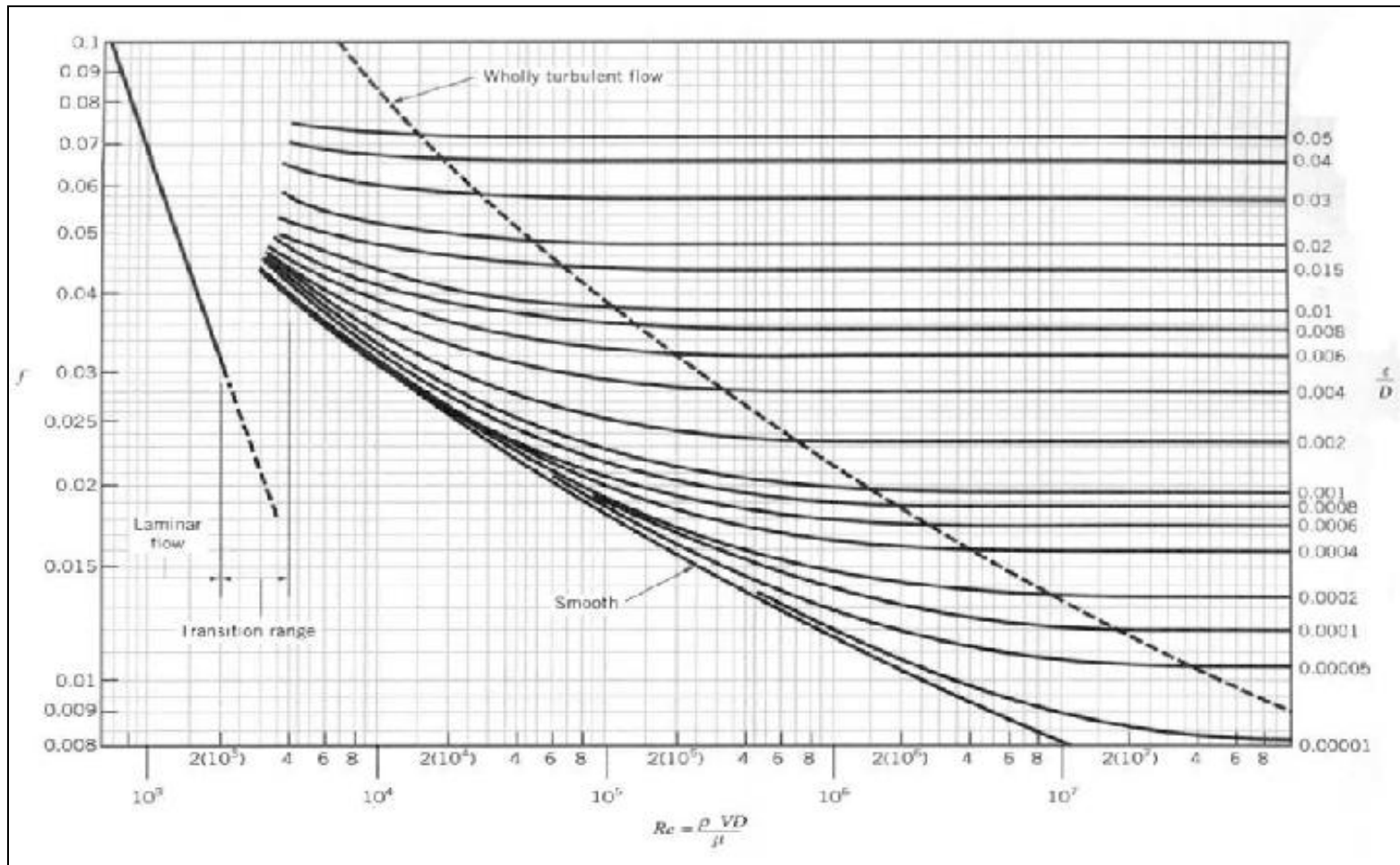


Figura H.1. Diagrama de Moody (Streeter y Bedford, 2003)

## APÉNDICE I. Estudio del comportamiento del caudal de operación

### Estudio del comportamiento del caudal de operación

Como ya se mencionó el caudal es la base para un tratamiento efectivo, es por ello que se hace necesario llevar un registro fidedigno de la variación de este parámetro. Específicamente en la planta de tratamiento de Pie de Cerro el caudal experimenta muchos cambios, que deben ser tomados en cuenta. La figura IV.40, refleja el comportamiento del caudal a la entrada y a la salida de la planta de tratamiento en diversos instantes de tiempo. Las mediciones de caudal se realizaron con un caudalímetro portátil.

Tabla I.1. Registro de caudal a la entrada y a la salida de la P.T. Pie de Cerro.

Hora	Caudal de entrada (l/s)	Caudal de salida (l/s)	Observación
10:30	88	90	
11:00	90	90	
11:15	87	70	
11:30	87	90	
11:45	88	92	
12:00	87	90	
3:10	89	60	Lavado de filtro a las 1:30 pm

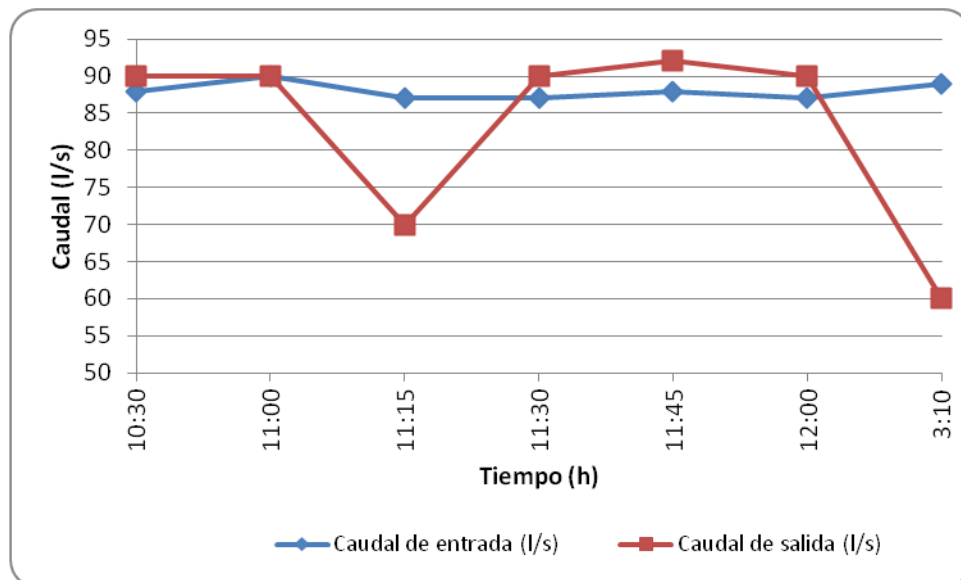


Figura I.1. Caudal de entrada y de salida de la planta de tratamiento de Pie de Cerro.

En la figura IV.39 se puede observar la variación que existe entre los caudales de entrada y de salida, resaltando los casos donde el caudal de entrada resulto ser menor al de salida, cuyo comportamiento no es lógico, sin embargo existen factores que inciden en el error de este resultado y son presentados a continuación:

- El medidor de caudal utilizado pudiese no tener un funcionamiento óptimo para este tipo de tuberías.
- Como no se dispone de un tramo de tubería libre (sin accesorios, ni enterrada) que permita la medición del caudal total de entrada a la planta, se realiza de forma individual en los tramos de tubería que pueden ser descubiertos ubicados en las afueras de la planta.
- El caudal de salida no es el real, ya que previo al caudalímetro destinado para esta lectura, se encuentran varias tomas de captación de aguas provenientes de las casas aledañas a la planta.
- El consumo de agua dentro de la planta, sobre todo al momento del lavado de los filtros, también produce una diferencia entre el caudal de entrada y salida de la planta.